

MESTRADO INTEGRADO  
ARQUITETURA

# Projetar com o Invisível: Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto

Marco Daniel Leitão Borges

**M**  
**2018**



Marco Daniel Leitão Borges. Projetar com o Invisível:  
Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto



Projetar com o Invisível: Integrando Desenho e  
Performance no Processo de Projeto

Marco Daniel Leitão Borges



Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto

**Projetar com o Invisível:**

Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Arquitetura  
pela Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto

Ano Letivo 2017/2018

Marco Daniel Leitão Borges

Orientador:

Professor Doutor José Pedro Ovelheiro Marques de Sousa da Faculdade de Arquitetura da  
Universidade do Porto

Porto, Setembro de 2018





Aos meus pais



## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, pela inspiração e força em todos os momentos.

Ao Professor José Pedro Sousa, pelo apoio e conhecimento partilhado.

Aos membros do DFL pela amizade e ensinamentos.

Ao Francisco, Néilson, Francisco e Fábio, pela amizade incondicional.

Á Ana e ao Rodrigo pelas aventuras da faculdade.

Á bicicleta pela resistência e sofrimento que me fortalece.

A todos, o meu obrigado.



## RESUMO

**Projetar com o Invisível:** Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto.

Ao longo da história, o arquiteto tem respondido de forma empírica e intuitiva às condicionantes performativas que lhe têm surgido, promovendo a alteração dos modos de pensamento e atuação daquilo que constrói. Atualmente, os requerimentos impostos aos edifícios são mais exigentes e prendem-se também com a performance e com o nível de conforto proporcionado por fatores não visíveis, como as forças estruturais, o sol ou o som. Por esta razão, esta dissertação pretende promover uma visão de integração da performance no processo de arquitetura.

Iniciando com a discussão dos conceitos de *desenho* e de *performance*, estuda-se o modo como as noções de desempenho têm vindo a ser envolvidas no processo de projeto. Recuando no tempo, constatamos que alguns autores abordaram estas questões de desempenho desenvolvendo, para isso, as suas próprias técnicas analógicas de análise, donde resultaram novos conceitos formais e materiais. Com a introdução das tecnologias digitais, o arquiteto passa a disfrutar de um “estirador digital” que lhe permite desenhar espaço e analisar a performance mais facilmente e de modo integrado no seu ambiente de trabalho habitual. As tecnologias CAE, normalmente associadas ao engenheiro, vieram complementar os recursos dos *softwares* CAD, potenciando a criação de espaços mais conformes com as exigências projetuais. No entanto, o arquiteto não tem potenciado ao máximo estas capacidades, continuando a focar-se maioritariamente nas questões do desenho formal e relegando o estudo das preocupações performativas às diferentes especialidades.

Deste modo, a análise de três casos de estudos vem demonstrar como a análise da performance pode influenciar a forma final e favorecer o desempenho do edifício quando entendida como um instrumento de desenho, com o contributo das tecnologias digitais.

A dissertação conclui que, com as possibilidades de simulação e análise que as tecnologias digitais oferecem, os temas de performance passam a ser parte integrante do projeto, transformando a linearidade entre *desenho* e *performance* numa atitude colaborativa entre as especialidades envolvidas no projeto.

**Palavras-chave:** Projeto de Arquitetura, Performance do Edifício, Projeto Digital, Análise Digital, Interdisciplinaridade.



## ABSTRACT

**Designing with the Invisible:** Integrating Drawing and Performance into the Design Process.

Throughout history, the architect has been responding intuitively and empirically to the performative constraints that emerged, promoting a constant adjustment to the way they think and design. Nowadays, the building requirements are more demanding and concerned with the performance and comfort, resulting from invisible themes like the structural forces, the sun and the sound. This dissertation pretends promote the vision of performance integration into the design process.

Starting with the discussion of the concepts of *drawing* and *performance*, we studied the way that the performance notions have been integrated in the design process. Going back, we noticed that some professionals approached these performance ideas, developing their own analogous analysis techniques, resulting in new material and formal concepts. With the introduction of the digital technologies, the architect welcome a “digital drawing table” that allows him to draw space and to analyse performance in an easier and integrated manner in his traditional working environment. The CAD software enhanced by the CAE technologies, often associated to the engineer, allowed the architect to design space according to the project requirements. Nonetheless, the architect hasn’t been able to take full advantage of these capacities, persisting to focus mostly on the formal design and relegating the performative studies to the different specialists.

The three case studies presented, show how the performance analysis can impact on the final shape improving the building performance, when considered as a drawing tool and with the backing of the digital technologies.

The outcome of this dissertation is that, with the possibility of simulation and analysis offered by digital technologies, the performance subject becomes an integral part of the project, transforming linearity between *design* and *performance* in a more collaborative attitude between the different parties involved in the project.

**Keywords:** Architectural Design, Building Performance, Digital Design, Digital Analysis, Interdisciplinarity.



Nota prévia:

Todas as citações de língua estrangeira foram traduzidas para a língua portuguesa pelo autor.

## ÍNDICE

Agradecimentos	5
Resumo	7
Abstract	9
Índice	11
Lista de Acrónimos	13
CAPÍTULO 1 _ INTRODUÇÃO	
1.1 _ Motivação	17
1.2 _ Tema e Objetivo	17
1.3 _ Metodologia	19
1.4 _ Estrutura	20
1.5 _ Contributos	21
CAPÍTULO 2 _ DESENHO E PERFORMANCE	
2.1 _ Conceitos	27
2.2 _ Da Separação à Integração	31
2.3 _ Interferência das Tecnologias Digitais	49
CAPÍTULO 3 _ PROJETAR COM O INVISÍVEL	
3.1 _ Arquitetura e Performance	63
3.2 _ Projetar Com	75
3.2.1 _ As Forças   Qatar National Convention Centre	75
3.2.2 _ O Sol   London City Hall	89
3.2.3 _ O Som   Elbphilharmonie	107
3.3 _ Experiência Pessoal	127
CAPÍTULO 4 _ CONSIDERAÇÕES FINAIS	137
Referências Bibliográficas	145
Referências de Imagens	153



## LISTA DE ACRÓNIMOS

BIM \_ *Building Information Modelling*

BREEAM \_ *Building Research Establishment Environmental Assessment Method*

CAD \_ *Computer Aided Design*

CAE \_ *Computer Aided Engineering*

CAM \_ *Computer Aided Manufacturing*

CFD \_ *Computational Fluid Dynamics*

CNC \_ *Computer Numeric Control*

DFL \_ *Digital Fabrication Laboratory*

ESO \_ *Evolutionary Structural Optimization*

FAUP \_ *Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto*

FEA \_ *Finite Element Analysis*

FEM \_ *Finite Element Method*

LED \_ *Light Emitting Diode*

LEED \_ *Leadership in Energy and Environmental Design*

MEP \_ *Mechanical, Electrical, Plumbing*

MIT \_ *Massachusetts Institute of Technology*

SMART \_ *Software Modelling Analysis Research Technologies*



## **CAPÍTULO 1 \_ INTRODUÇÃO**



## **1.1 \_ Motivação**

Desde cedo me interessei pelas componentes técnicas e construtivas do projeto, porém, durante o meu percurso académico estas questões foram ganhando uma maior relevância. A escolha do tema desta dissertação surge de uma introspeção pessoal e da análise crítica da aprendizagem de Arquitetura na FAUP. Nos estudantes finalistas de curso, parece evidente um défice de aptidões perante as exigências que o momento atual impõe à construção e arquitetura. Neste contexto, seria útil um maior domínio das questões de desempenho do objeto arquitetónico, de modo a que possa emergir de forma integrada do próprio desenho da arquitetura.

Sendo uma tecnologia cada vez mais acessível, o interesse pelas tecnologias digitais consolida-se no MIArq aquando do primeiro contacto com algumas destas ferramentas nas unidades curriculares de Geometria e Geometria Construtiva. As tecnologias digitais estão cada vez mais presentes no processo de projeto pois complementam algumas das limitações processuais do desenho tradicional, permitindo ao arquiteto focar a sua atenção em aspetos do projeto que urgem nos dias de hoje com reforçada importância, como é o caso do comportamento estrutural, desempenho acústico e térmico, exposição solar, sustentabilidade material, entre outras.

## **1.2 \_ Tema e Objetivo**

Desde Vitruvius que um projeto de Arquitetura está, inevitavelmente, sujeito a várias condicionantes de modo a corresponder adequadamente às funções que se esperam do edifício. Para além do próprio programa, incluem-se nessas funções as questões de performance relacionadas com o desempenho do edifício, isto é, no modo como o edifício se comporta perante determinado fator. E, apesar de não serem qualidades muito tangíveis, a consideração destes aspetos é fundamental em qualquer



projeto, daí o título da dissertação que se refere a elas com o “projetar com o invisível”.

Se tradicionalmente os engenheiros, ou os especialistas, se ocupam do tratamento da maior parte destas preocupações realizando os cálculos a partir do desenho do arquiteto, com as novas tecnologias digitais verifica-se a possibilidade delas serem analisadas em tempo real diretamente sobre os modelos digitais desenvolvidos pelo arquiteto. Com isto, a separação entre os momentos de desenho e análise e, também, a distinção entre as ferramentas do arquiteto e do engenheiro, tendem a dissipar-se. Os programas de desenho assistido por computador (CAD) incluem cada vez mais ferramentas de análise como parte integrante do seu “estirador” digital. Simultaneamente, os programas de engenharia assistida por computador (CAE) apresentam capacidades de desenho mais abrangentes fazendo, muitas vezes, parte do mesmo “ecossistema” digital. Assim, é cada vez mais fácil arquiteto e engenheiro colaborarem de forma interativa (BIM), fomentando uma maior harmonia entre desenho e performance.

Tal como refere Branko Kolarevic (2003, 26), *“embora as tecnologias digitais, em particular as simulações baseadas na performance, tenham tornado possível a noção de arquitetura performativa, existem desafios e oportunidades na maneira como estas tecnologias estão a ser concetualizadas e usadas. Em vez de serem usadas de forma passiva, ‘after-the-fact’, ou seja, depois da forma do edifício ter sido articulada, como é atualmente o caso, a computação analítica poderia ser usada para moldar ativamente os edifícios de uma maneira dinâmica, de uma forma semelhante a como o software de animação é usado na arquitetura contemporânea.”*.

Em suma, o objeto desta dissertação consiste numa reflexão sobre o processo de projeto na arquitetura, investigando estratégias e ferramentas que permitam uma maior integração entre o seu desenho e a sua performance.

Deste modo, esta dissertação tem dois objetivos principais:

Por um lado, a compreensão dos conceitos de Desenho, Performance e da evolução da sua relação no campo da Arquitetura. Para isso, será importante caracterizar as tarefas tradicionalmente associadas ao arquiteto e ao engenheiro, e averiguar o impacto das novas tecnologias digitais na sua dinâmica de colaboração. O que aqui está em causa é perceber o interesse e a oportunidade de facilitar a integração de preocupações de análise no processo criativo, conduzindo a uma maior informação da performance do desenho do projeto.

Por outro lado, a um nível mais pessoal e prático, pretende-se ampliar e adquirir novas competências ao nível das tecnologias digitais, relacionadas principalmente com as questões de Performance abordadas ao longo da dissertação, tendo consciência da importância que estas tecnologias representam no futuro do processo de desenvolvimento de um projeto. Para isso serão explorados alguns *softwares* de desenho e de análise da performance com o computador.

### **1.3 \_ Metodologia**

A ordem de trabalhos para esta dissertação desenvolveu-se segundo um escalonamento delineado de tarefas de componente teórica (T) e prática (P).

A componente teórica considerou a seguinte divisão:

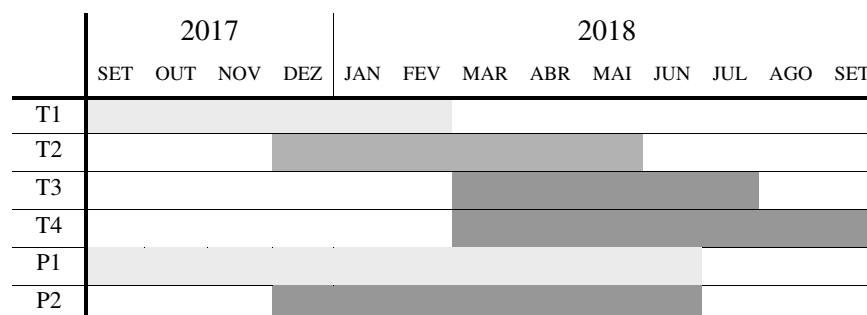
- T1 – Pesquisa e leitura de bibliografia específica do tema para posterior seleção da informação a utilizar consoante o tema apurado durante esta fase.
- T2 – Seleção, recolha e tratamento de bibliografia selecionada de acordo com o campo de trabalho escolhido.
- T3 – Seleção e análise dos casos de estudo.
- T4 – Organização e redação dos conteúdos nos respetivos capítulos.

Enquanto que na componente prática tivemos:

- P1 – Participação em trabalhos práticos em curso no DFL (*Digital Fabrication Laboratory*), como obtenção de competências digitais.
- P2 – Introdução a *softwares* de análise performativa relevantes aos objetos em estudo.

**Figura 1.1\_**

Calendarização das tarefas realizadas durante a dissertação.



## 1.4 \_ Estrutura

Esta dissertação organiza-se em cinco capítulos, a seguir identificados:

### Capítulo 1 \_ INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentadas as motivações que levaram à escolha do tema de estudo, identificados os objetivos pretendidos, a metodologia de trabalho e calendarização das diversas tarefas a cumprir, assim como, a estrutura que esta dissertação segue.

### Capítulo 2 \_ DESENHO E PERFORMANCE

Este capítulo pretende refletir sobre o processo de projeto, discutindo dois conceitos complementares: desenho e performance.

Assim, divide-se em duas partes principais; a primeira descreve a evolução da sua relação, desde a separação à integração entre desenho e performance no processo de projeto. A segunda aborda o papel do computador e das tecnologias digitais na análise de fatores performativos, e sua interferência na relação descrita.

### Capítulo 3 \_ PROJECTAR COM O INVISÍVEL

O terceiro capítulo explora o tema da integração de forma mais aprofundada, iniciando-se pela sua definição e papel dentro do processo de projeto digital, servindo de introdução para o restante capítulo.

Para compreender e ilustrar esta posição, elegem-se três temas de exigência performativa, referentes à ação das forças, do sol e do som. Para cada uma delas, teremos uma breve contextualização do conceito, apresentando modos e técnicas de análise adotadas no passado, e terminando com a análise de um caso de estudo já construído, referente a cada uma das componentes. Estes casos de estudo ganham relativa importância pois consolidam a informação anterior e reforçam o paradigma entre desenho e performance. Os casos de estudo selecionados foram, respetivamente, o Qatar National Convention Centre, o London City Hall e a Elbphilharmonie.

### Capítulo 4 \_ CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste último capítulo, enumeram-se as oportunidades da integração de desenho e performance no processo de projeto, revelando uma preocupação performativa numa arquitetura que procura corresponder aos fatores específicos do projeto. O arquiteto continuará a ser o elemento principal de todo o processo, agora porém, com maior preocupação no que toca ao desempenho do edifício, exaltando a sua importância na componente do desenho e impondo maior responsabilidade em todo o processo de projeto integrado que abrange diversas especialidades.

## **1.5 \_ Contributos**

Esta dissertação pretende contribuir para um entendimento da integração no desenho de projeto da consciência dos aspetos performativos. Por outro lado, contribui também para a noção das capacidades do computador para além do desenho. Adicionalmente pretende-se fomentar uma consciencialização sobre a necessidade de integração e de estreita

## **Projetar com o Invisível**

### **Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto**

colaboração entre arquiteto e engenheiro, pois só assim um projeto de arquitetura poderá melhorar o conforto sentido pelo seu utilizador. Apoiando esta ideia, espera-se alertar para o interesse destas novas ferramentas também no ensino da arquitetura, questionando até que ponto as valências dotadas atualmente pelos alunos finalistas se mostram suficientes para um futuro profissional cada vez mais tecnológico, competitivo e exigente.

Pela abrangência e atualidade dos temas abordados, a um nível mais pessoal, servirá de contributo para um crescimento consciente da importância das questões performativas no processo de projeto. Além desse crescimento intelectual e teórico, também a aquisição de competências digitais constituirá uma mais valia para o meu futuro profissional já que, durante este trabalho, foram explorados diversos *softwares* de análise performativa que suscitaram interesse e proporcionaram uma melhor compreensão da temática abordada.





## **CAPÍTULO 2 \_ DESENHO E PERFORMANCE**



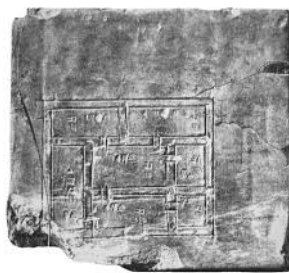


## 2.1 \_ Conceitos

*“DESENHAR. Com o desenho como instrumento de transmissão.  
Com traços expressivos que transportam as ideias para o papel.  
Com traços precisos que permitem ao executor concretizar a sua  
construção.” (Baeza 2011, 41)*

Desenho, esquisso, esboço, gravura, figura. Muitos outros são os termos atribuídos à produção gráfica resultante do ato de desenhar. Um ato que remonta aos primórdios da civilização quando o Homem, fazendo uso dos materiais que tinha à disposição, começou por gravar instintivamente, as suas ideias, vivências, invenções ou crenças religiosas, na pedra - o papel do seu tempo.

Destes registos gráficos dos períodos vividos, viriam a proliferar muitos dos parâmetros culturais das sociedades. Segundo Edward Robbins (1997, 7), evidências de sociedades pré-históricas, nomeadamente dos caçadores-recolectores, demonstram que o Homem, já nesse período, recorria ao desenho antes de iniciar a construção [Figura 2.1]. Do desenho nasceu o número e a escrita e destes desenvolveu-se a alfabetização. O desenho evoluiu com o Homem e com ele, o Homem evoluiu.



**Figura 2.1\_**  
Representação arquitetónica  
na Mesopotâmia, 2450 a.C.

O desenho de imagens faz parte da produção cultural do Homem desde há muito tempo e a arquitetura, enquanto manifestação cultural, não é exceção. Desde a antiguidade à Idade Média que as alterações na prática do desenho antecipam mudanças na maneira como a arquitetura é produzida. Essas mudanças culminaram na condição cultural e social do

arquiteto renascentista que Robbins considera prevalecer até aos tempos modernos.

A arquitetura, arte da criação de formas e volumes organizados, faz uso da imaginação para construir o espaço, construído e vazio, que nos rodeia. Nesta busca de forma, volume e estética, o arquiteto enquanto sujeito principal da ação, exterioriza as suas ideias pensadas desenhando. Para isso usa o papel e o lápis. Na arquitetura, *"de uma perspectiva individual e cultural, o desenho desempenha um papel importante, se não inteiramente decisivo, na criação e desenvolvimento de ideias arquitetónicas."* (Robbins 1997, 32).

De acordo com Peter Jurgensen (1986), do ato de desenhar podem ressaltar duas vertentes. Desenho como problematização, normalmente incessante na busca pela resposta mais adequada a um dado problema ou, por outro lado, o desenho enquanto solução do problema. Através dele o arquiteto pode comunicar rapidamente a sua ideia e, em fases finais do projeto, poderá utilizá-lo como ferramenta de apresentação que, normalmente, segue parâmetros particulares que permitem a correta leitura e construção da ideia projetada - ou como diria Campo Baeza (2011), da *"ideia construída"*. Deste modo, o desenho constitui a principal ferramenta de pensamento do arquiteto, o qual possibilita a exteriorização da ideia e a existência de arquitetura. Neste seguimento, o conceito "desenho" está, ao longo desta dissertação, associado à profissão do arquiteto.

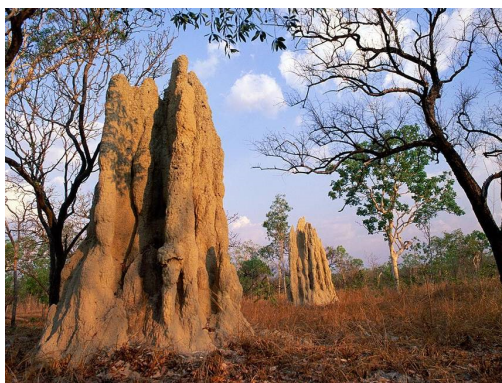
Em oposição, surge com grande relevância, o tema da performance, matéria cujo cálculo preciso é tipicamente atribuído à tarefa do engenheiro e que engloba fatores essenciais à correta e saudável vivência e percepção dos espaços. Como afirma Michael Hensel (2013), a noção de performance surge nos anos 50 nas humanidades e ciências sociais, progredindo mais tarde para as áreas científicas e artísticas. A sua emergência na arquitetura deveu-se a inúmeros desenvolvimentos em áreas científicas como a Biologia. A palavra "performance" é um estrangeirismo e significa estabelecer, executar ou dar forma a.

Em contexto arquitetónico, a performance refere-se ao desempenho de um edifício, ao modo como os vários sistemas que o constituem se comportam

durante a vida útil do edifício, avaliados pela sua eficiência. Branko Kolarevic (2005, 3) considera que a “ênfase crescente na performance do edifício – dos contextos culturais e sociais à física do edifício – está a influenciar o desenho do edifício, seus processos e práticas, desvanecendo a distinção entre geometria e análise, entre aparência e performance.”.

A performance aplicada à arquitetura abrange múltiplas realidades, sejam elas espaciais, sociais, culturais ou puramente técnicas – estrutura, exposição solar, acústica, dinâmica de fluídos, ventos, fluxos de pessoas, iluminação, climatização, entre outras. Todas estas valências, com maior ou menor facilidade, podem ser calculadas. Esta tarefa é, tradicionalmente, incutida ao engenheiro que executa os cálculos estabelecendo restrições e imposições que, por sua vez, afetarão o desenho donde resultará uma forma mais eficiente tendo em conta uma performance específica.

Na arquitetura, a incorporação da ideia de performance é relativamente recente. Ainda assim, considerando a natureza dos fatores que abrange, logo se percebe que ao longo da história, o Homem sempre construiu tendo em conta alguns desses aspetos performativos. Um pouco à semelhança de outros animais [Figura 2.2], fê-lo de forma intuitiva e baseada nas necessidades e experiências acumuladas ao longo do tempo.



**Figura 2.2\_**

Cupinzeiros. Os ninhos das térmitas podem atingir vários metros de altura e são o resultado de exigências performativas. Possuem canais que permitem a regulação da temperatura e humidade interior de forma natural, proporcionando um microclima ideal à sua sobrevivência.

Deste modo, temos o desenho que se encarrega da conceção e representação da ideia enquanto que a performance pressupõe a análise do desempenho dessas mesmas ideias. Simultaneamente, as origens e os temas de desenho e performance incitam, também, a uma distinção disciplinar. Por um lado, a Arte que surge associada ao desenho pela

## **Projetar com o Invisível**

### **Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto**

consideração gráfica, estética e geométrica que o arquiteto induz na sua tarefa. Por outro lado, temos as questões da performance que recorrem a noções intuitivas, empíricas e abstratas, denotando uma relação mais próxima do engenheiro para com a Ciência. É esta diferenciação disciplinar que acaba por ditar os diferentes modos de atuação entre arquiteto e engenheiro.

Em suma, o entendimento desta diferenciação entre campos disciplinares e a compreensão de ambos os conceitos, de desenho e de performance, é fundamental para se compreender a separação profissional invocada de seguida.

## 2.2 \_ Da Separação à Integração

Para abordar o tema desta dissertação, é essencial debruçarmo-nos sobre os modos de relação entre desenho e performance, que naturalmente, convocam a relação entre arquiteto e engenheiro, entre arte e ciência. Para isso é fundamental recuar no tempo e analisar como a atividade profissional de ambos progrediu até aos dias de hoje.

O homem, enquanto ser racional, desde sempre tem a capacidade de dar uma resposta perante os problemas com que se depara, procurando despende o mínimo de energia e obter o máximo de conforto e bem-estar. Nos primórdios tal problema prendia-se com a sua proteção face às ameaças do mundo que o rodeava. Na construção da tenda, com a disposição circular vertical de ramos de madeira e com a ajuda de elementos vegetais ou animais, o Homem criou uma “pele” que o protegeu da chuva, do vento e do frio. Com uma tenda criou abrigo, com várias formou comunidade.

*“Depois veio a cabana. O homem pensou que podia construir o tectónico. O pássaro faz o seu ninho e a abelha o seu favo de mel segundo leis próprias, difíceis de descrever, mas com uma exatidão cega e perfeita. O homem compreendeu, ainda que de uma forma inconsciente, as leis da gravidade e construiu a sua cabana. Com troncos e ramos, com pedras e blocos de gelo. E sempre com a razão que, também inconscientemente, emprega mecanismos geométricos. E embora tenha sido apenas para se refugiar e para se defender pôde então, com mais liberdade do que acontecia com a caverna, eleger o sítio e decidir o local e a forma da sua habitação. E a sua capacidade de criação, que na caverna se revelara através da pintura, manifestou-se aqui – assim queria eu entendê-lo – pela arquitetura, pela mais primitiva arquitetura.”* (Baeza 2011, 57).

Da caverna à tenda e da tenda à cabana primitiva não foram necessários grandes progressos técnicos. Os materiais continuavam a ser oferecidos ao Homem pela natureza e apenas necessitou de repensar a forma de os articular. Pelo meio foram inventados utensílios e apuradas as técnicas de manufatura. O Homem protegeu-se das ações da natureza, usando



**Figura 2.3\_**

Representação da cabana primitiva de Vitruvius.

Gravura de Charles Eisen para a capa de *Essai sur l'Architecture*, por Marc-Antoine Laugier, 1755.

precisamente os materiais que tinha à disposição e em abundância na natureza [Figura 2.3].

Ainda que arcaicas, estas construções já nessa altura consideravam algumas performances básicas, não palpáveis nem visíveis, mas sentidas. Performances como a orientação solar, a direção e intensidade dos ventos ou a ventilação dos espaços determinavam o modo como se construía resultando daí espaços organizados consoante zonas funcionais, promovendo eficiência e conforto.

Segundo Reyner Banham (1969), por norma, nas sociedades primitivas as pessoas tendiam a agrupar as suas atividades em redor de um ponto central - um poço, a sombra de uma árvore, uma fogueira ou um grande professor - habitando um espaço cujos limites externos eram, normalmente, vagos e ajustáveis consoante a função desejada. Aprofundando, Banham constata que *“a saída de calor e luz de uma fogueira é efetivamente dividida em anéis concêntricos, mais brilhantes e quentes perto do fogo, mais frios e mais escuros longe dele, de modo que o dormir é uma atividade de anel externo e as atividades que exigem visão pertencem aos anéis internos. Mas, ao mesmo tempo, a distribuição de calor é influenciada pelo vento, e o rasto de fumo torna o lado a favor do vento pouco atraente, de modo que o zoneamento concêntrico é interrompido por outras considerações de conforto ou necessidade.”* (1969, 20). A análise a um elemento aparentemente tão básico demonstra o quanto a performance, muitas vezes invisível, é essencial na organização do espaço e na sensação de conforto.

Mais tarde, com a fixação dos povos e com a acumulação de capital e equipamento necessários na produção de cultura civilizacional, nas sociedades pré-tecnológicas, os materiais começaram a ser encarados como bens valiosos e permanentes. Por esta altura, *“era necessário não apenas criar ambientes habitáveis, como conservá-los.”* (Banham 1969, 20). A arquitetura tomara o carácter de arte criadora de estruturas permanentes e massivas, que asseguravam proteção e conforto permanente. Exemplo disso são as pirâmides, os templos gregos ou os teatros romanos, que ainda hoje permanecem reconhecíveis após milhares de anos sujeitos às forças naturais e humanas.

De certo modo, a profissão do arquiteto surge desta necessidade de construção duradoura, em que é necessário o domínio e conhecimento dos materiais, das técnicas e dos modos de construção.

O termo “arquiteto” tem origem no grego “*arkhitektôn*” (*arkhi* - principal e *tektôn* - construção) e significa “construtor principal”. Até ao final da Idade Média, “*os arquitetos, então chamados de Mestres Construtores*” (Candela 1993, 7), eram os grandes responsáveis pela construção dos edifícios. Estavam encarregues do desenho, da definição estrutural, do diálogo com construtores e clientes e do acompanhamento das obras. Talvez uma das razões para que a maioria das obras demorassem décadas a serem construídas. Por esta altura, o arquiteto, enquanto “mestre construtor”, dominava a pintura, a escultura, a engenharia, a arquitetura e outras disciplinas artísticas. Era o mestre do espaço desenhado, imaginado e construído.

Segundo Bill Addis, “*a definição de arquiteto, no sentido que agora entendemos, foi sem dúvida, criada em Itália durante o Renascimento.*” (2007, 133). Nesta época, as ocupações do arquiteto e do engenheiro eram ditadas pelas circunstâncias políticas da sociedade. O arquiteto passava a estar maioritariamente ligado à construção de fortificações e castelos e, quando desprovido da arquitetura militar, dedicava-se ao desenho de casas e edifícios públicos como igrejas, palácios, teatros ou aquedutos. De ambas as vertentes, herdou a consciencialização para com as questões performativas que, ainda assim, não se fizeram sentir numa sociedade que assistia a um crescimento populacional e cultural. Ainda segundo Addis (2007), com a formação dos grandes núcleos habitacionais e as crescentes revoluções industriais e períodos de instabilidade política, o arquiteto renascentista passou a focar-se principalmente no desenho. Com isto, as questões funcionais de desempenho foram sendo, gradualmente, respondidas de forma empírica, acentuando-se a dificuldade de comunicação e colaboração interdisciplinar.

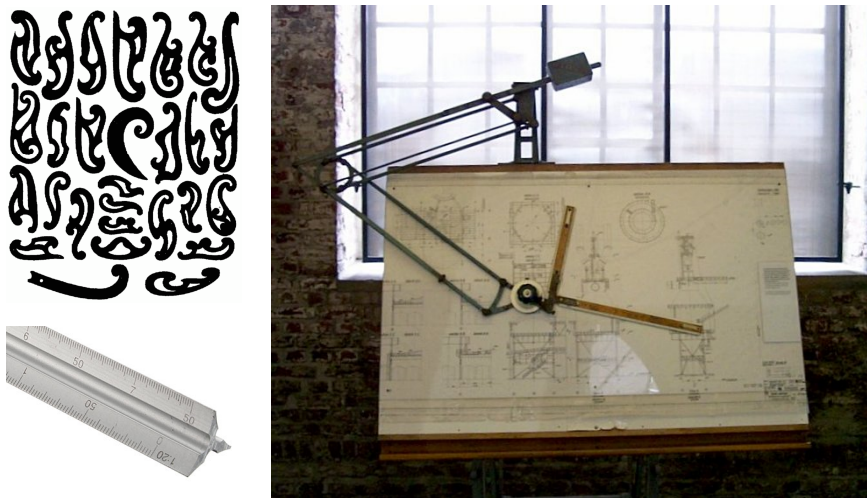
Apartir do século XIX, o arquiteto começa a desenhar espaço procurando a beleza final do todo, colocando para segundo plano as questões de desempenho e eficiência da obra. Uma ideia que reflete a realidade da



disciplina desde então. Deste modo, o arquiteto Félix Candela (1993, 7) refere que *“ao contrário do que se pode pensar, os arquitetos não estão muito interessados no misterioso processo que permite que estruturas ou edifícios permaneçam de pé. Eles tomam como certo que outra profissão relacionada resolverá o problema e, portanto, não serão atraídos para a tarefa de criar uma estrutura eficiente e económica, embora, por esse fato único, possa ser bonita na maior parte do tempo.”*.

A coordenação disciplinar encontrava-se longe do ideal e todo o processo de comunicação entre especialistas ainda funcionava como um sistema linear, em que o arquiteto desenhava a forma arquitetónica e o engenheiro, no passo seguinte, calculava o desempenho do edifício, garantindo a sua sustentação e exequibilidade. O resultado era uma incógnita e, por vezes, podia desvirtuar por completo as intenções iniciais do desenho do arquiteto. Ainda no século passado, tal separação disciplinar era tão pronunciada que *“se as pessoas encontrassem um engenheiro fazendo desenhos originais, projetos que só um arquiteto podia fazer, eles sentiam a necessidade de conceder a ele ou a ela um maior elogio, chamando-o ‘arquiteto engenheiro’.”* (Rice 1994, 71). Continuando, o engenheiro Peter Rice esclarece sobre a diferença entre o engenheiro e o arquiteto dizendo que *“a resposta do arquiteto é principalmente criativa, enquanto o engenheiro é essencialmente inventivo.”* (1994, 72). Esta diferenciação de conceitos é entendida se olharmos para os métodos utilizados por ambos ao longo do tempo.

Por um lado, o arquiteto trabalha substancialmente com o papel, com a geometria e com a representação gráfica. Os seus métodos de desenho baseiam-se no desenho livre ou rigoroso, com uso da régua, representações axonométricas, projeções e perspetivas, ou modelos físicos escalados, como forma de visualização, simulação e apresentação do projeto [Figura 2.4]. Por outro, o engenheiro que nos seus cálculos recorre aos modelos de simulação, às experiências físicas, à régua de cálculo, à calculadora e ao cálculo numérico efetuado mediante a *“aplicação de um código ou regulamento estreitamente definido.”* (Candela 1993, 7).



**Figura 2.4\_**

As curvas francesas, a régua de escalas ou a mesa de desenho são algumas das ferramentas que o arquiteto tem usado.

Como já foi referido, historicamente o arquiteto tem respondido intuitiva e empiricamente, propondo espaços fechados e estruturas massivas não só porque lhes foi ensinado a fazê-lo como é o que a sociedade espera deles. Segundo Fernando Távora (2006, 41) “*previram-se casas e outros edifícios que serviriam indiferentemente para qualquer homem e qualquer lugar*”, sem se avaliarem as necessidades reais do local e do Homem. No entanto, a certa altura a arquitetura deixara de ser vista como a arte consciente de criar estruturas massivas e duráveis, e passara a ser encarada profissionalmente como não mais do que essa arte, desprovida de consciência e colaboração disciplinar, razão para muitos dos problemas e incertezas que se têm vindo a arrastar até à atualidade.

Percebendo as consequências negativas que tal separação desempenhava na qualidade da arquitetura praticada nos últimos séculos, alguns arquitetos e engenheiros destacaram-se pela tentativa de reversão desta realidade. Nas suas experiências começaram a ter em consideração alguns aspetos performativos que nem sempre adquiriram a devida importância no desenvolvimento dos projetos até então, pela dificuldade em prever visualmente o seu comportamento. Destas experiências viriam a surgir muitos dos avanços técnicos, materiais e construtivos que hoje possibilitam algumas das formas construídas.

## Projetar com o Invisível

### Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto

Antoni Gaudí (1852–1926), arquiteto catalão, é o autor de obras da cidade de Barcelona como a Casa Batlló (1906), a Casa Milà (1910), o Park Güell (1914) [Figura 2.5], a Cripta de la Colònia Güell [Figura 2.6] ou a Sagrada Família, entre muitas outras. Todas elas se destacam pelas formas arrojadadas que Gaudí idealizou, seja pelo constante uso da curva como pela inspiração nos elementos da natureza e conjugação de cores, materiais e ornamento.

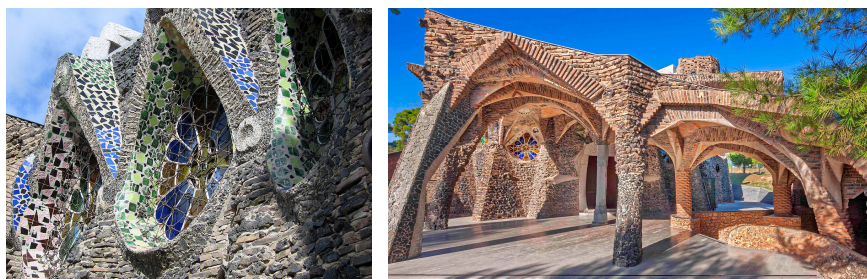
**Figura 2.5\_**

cima: Passagem interior na Casa Milà, “La Pedrera”, 1910.  
baixo, direita: Park Güell, 1914.



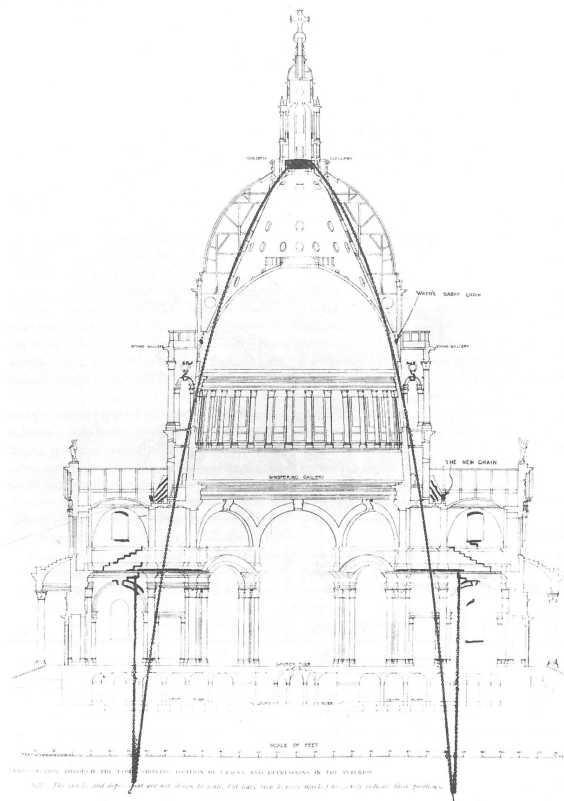
**Figura 2.6\_**

Cripta de la Colònia Güell, 1915.



Na construção da Cripta de la Colònia Güell, concluída em 1915, Gaudí inventou novas técnicas de construção e testou de forma inovadora, formas estáticas que viria a aplicar em grande parte das suas obras. Essas formas resultaram de um trabalho de procura da forma, também apelidado de *form-finding*, através do uso de modelos invertidos. Este método não era novo pois já em 1671 Robert Hooke anunciara à Royal Society que tinha descoberto a forma ideal para um arco (Pavani 2018). Uma solução que “pendurada é uma linha flexível, mas quando invertida forma um arco rígido” (Addis 2007, 206). No final do século XVII, Gottfried Leibniz, Christiaan Huygens e os irmãos Bernoulli descobriram a definição

algébrica da curva da corrente suspensa e demonstraram que essa forma não era, como Galileo tinha conjecturado, uma parábola mas uma catenária. (Pavani 2018) [Figura 2.8]. Assim, apesar de não ser o inventor desta técnica, Gaudí destaca-se pela predisposição demonstrada em considerar este princípio na avaliação da performance das suas obras, aplicando-o ativamente na exploração formal e estrutural dos seus projetos.



**Figura 2.7\_**

A forma de catenária é encontrada durante a construção de uma ponte, após a suspensão dos seus cabos. Ao longo da sua curva é aplicada uma carga uniforme, correspondente ao peso próprio do cabo.

**Figura 2.8\_**

Saint Paul's Cathedral, Londres. Sir Christopher Wren, 1675-1711. Seção pela cúpula mostrando a sobreposição de uma corrente pendurada invertida.

Com o objetivo de estudar a capacidade estática da estrutura, Gaudí construiu um modelo tridimensional escalado usando fios de cânhamo aos quais pendurou sacos com chumbo ou areia e tecido [Figura 2.9]. Os sacos representavam, em proporção, o peso e posição das cargas estruturais exercidas pela estrutura, resultante dos seus cálculos. Os retalhos de tecido colocados entre os arcos ajudavam a visualizar as paredes e abóbadas. Fotografando o modelo invertido e usando espelhos para esse efeito, o resultado – uma linha catenária – originava uma estrutura estável e otimizada que, em termos estruturais, representava um sistema contínuo de pilares e barras de suporte. Destes modelos emergiam formas desprovidas



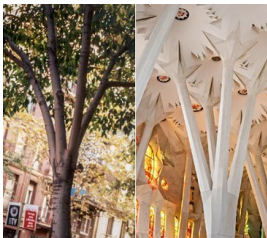
## Projetar com o Invisível

Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto

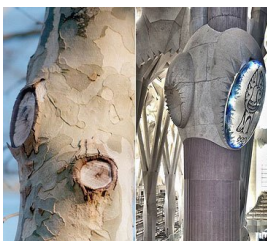
de contrafortes e arcos rampantes, presentes na Arquitetura Gótica e, como seu intuito, mais semelhantes às formas que se autossustentam e que podem ser encontradas em grande quantidade na natureza [Figura 2.10].

**Figura 2.9\_**

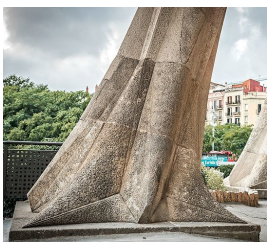
Modelo de correntes e tecido suspenso da Cripta de la Colònia Güell.



*“Querem saber onde encontrei o meu modelo?”* perguntou Gaudí a alguns visitantes do seu atelier. *“Veja-se uma árvore direita; suporta os ramos, estes os raminhos e estes as folhas. E cada uma das partes cresce harmoniosa e milagrosamente, desde que o artista, que é Deus, as criou”* (Zerbst 1993, 30).



Antoni Gaudí estudaria também *“o comportamento de blocos de pedra sob grande pressão, introduzindo-os numa grande prensa hidráulica e, estranhamente, as pedras não rebentaram com uma fenda grande de cima para baixo, mas dilataram-se na parte central, um fenómeno que, segundo a opinião de Gaudí, já tinha sido descoberto pelos gregos que construíam as suas colunas com um pouco mais de espessura no meio do que nas extremidades.”* (Zerbst 1993, 31).



**Figura 2.10\_**

Na Sagrada Família é evidente a inspiração nos elementos naturais.

Muitas vezes Gaudí era apelidado de “mestre construtor”, facto que vai de encontro à observação de Candela de que *“noutros tempos mais simples, os arquitetos, então chamados de Mestres Construtores, (...) contavam entre os serviços oferecidos aos seus clientes o de conseguir, por si sós, que os edifícios que construíam se mantinham estáveis.”* (1993, 7). Gaudí

era assim apelidado pela proximidade que tinha com a obra e seus construtores, para além do domínio que possuía sobre a forma, materialidade e manipulação dos modelos físicos que desenvolvia na exploração e apresentação das duas ideias.

A Sagrada Família, iniciada em 1883 e ainda em construção, é exemplo de como, apesar das circunstâncias históricas, a arquitetura pode demorar anos, décadas ou até mesmo séculos a ser concretizada [Figura 2.11]. Atualmente, com as tecnologias digitais e meios disponíveis seria fácil equacionar estratégias e métodos de construção mais céleres, no entanto, pensando que há um século atrás Gaudí foi capaz de desenvolver analogicamente todo o processo a que uma obra daquela escala obriga fez dele uma fonte de inspiração para muitos dos que o seguiram.



**Figura 2.11\_**  
Sagrada Família, Barcelona.

O arquiteto e engenheiro Eduardo Torroja (1899–1961) foi um deles. Destacou-se essencialmente pelas investigações sobre o comportamento dos materiais, especialmente do betão armado pré-tensionado e pelos métodos de análise estrutural que desenvolveu. A exploração do betão armado por Torroja, iniciou-se em meados da década de 1930 e centrou-se na construção de superfícies contínuas, com o objetivo de as tornar o mais leves possível. O próprio considerava que *“a melhor estrutura é aquela que é mantida pela sua forma e não pela resistência oculta do seu material”* (Barrallo 2011, 67).

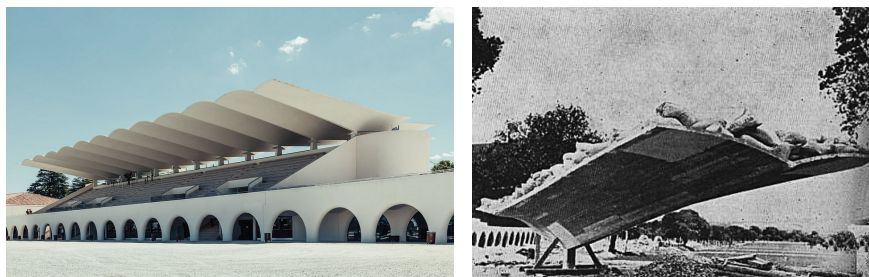
## Projetar com o Invisível

Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto

De entre os mais de oitocentos trabalhos que Torroja realizou, destaca-se o Hipódromo de la Zarzuela, em Madrid (1941). A sua cobertura balança-se 13 metros sobre a bancada e tem apenas 50mm de espessura. Para ajudar a definir os locais a serem reforçados com aço tensionado, Torroja estudou o comportamento de um simples modelo físico feito de cartão e com isso esboçou um padrão aproximado das tensões internas aplicadas. A experiência forneceu-lhe a base para prosseguir para o cálculo aprofundado da espessura e do espaçamento das barras de aço. De modo a verificar a segurança da forma estrutural, serviu-se de um protótipo da cobertura que usou não só para testar o desempenho estrutural e a veracidade dos cálculos como a possibilidade de reutilização da cofragem, tendo-se confirmado ambos eficazes [Figura 2.12].

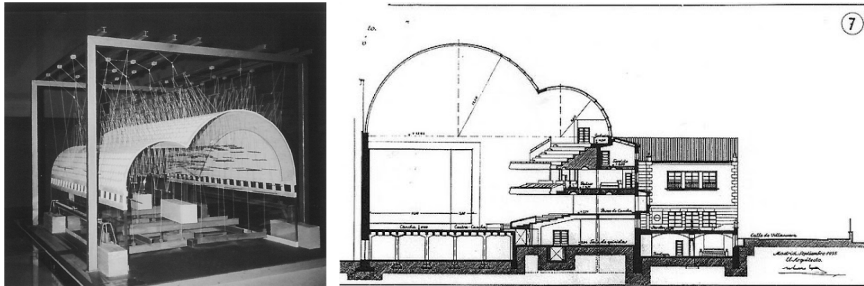
**Figura 2.12\_**

Teste estrutural a protótipo de um módulo da cobertura do Hipódromo de Zarzuela, 1941.



Outro trabalho de Torroja, igualmente ousado, foi o Frontón Recoletos, em Madrid (1935). A cobertura deste pavilhão desportivo é composta por uma concha cilíndrica composta por dois lóbulos que cobrem uma área de 32 por 55 metros. Aqui, mais uma vez *“um modelo simples feito de cartão, fixado nos topos por paredes de madeira, confirmou a rigidez geral da forma da curva e a necessidade de fornecer apoio firme às bordas longitudinais das conchas curvas, especialmente onde os dois lóbulos se cruzavam.”* (Addis 2007, 491). A concha em betão reforçado possui uma espessura de apenas 80mm na maioria da cobertura, exceto na interseção dos dois lóbulos onde este número aumenta para 150mm. Como forma de comprovar os resultados, Torroja construiria um outro modelo à escala 1/25 para simular as deflexões do peso próprio da estrutura assim como o comportamento face ao vento e neve [Figura 2.13]. Estes resultados mostraram-se bastante próximos dos calculados, com uma diferença de

deflexão de apenas 100mm entre a estrutura construída e a previsão calculada, dando-lhe garantias da sua exequibilidade.

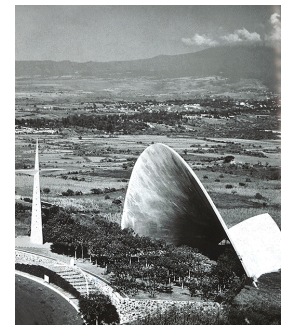
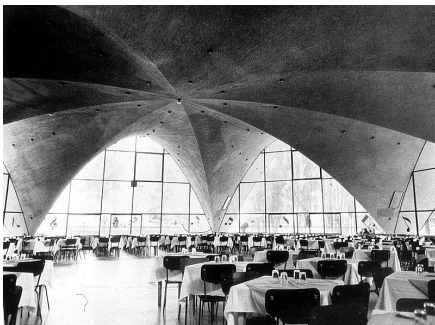


**Figura 2.13\_**  
Modelo de análise estrutural  
da cobertura do Frontón  
Recoletos, 1935.

Os trabalhos de Torroja confirmariam o poder deste novo material e viriam a incentivar a que outros autores se dedicassem a usar modelos físicos combinados com o cálculo matemático, como forma de assegurar o cumprimento da performance. Félix Candela (1910–1997), arquiteto e engenheiro, viria a revelar influências de Torroja e a procurar constantemente a ideia de leveza na sua obra.

Apesar de ter desenhado variadas formas, o seu trabalho intensificou-se nos paraboloides hiperbólicos (forma idêntica a uma sela), uma forma diferente do que tinha sido feito até então. Nestas conchas em betão – *concrete shells* – Candela viu a economia material e garantia estrutural ocultada pela complexidade artística da forma produzida. As suas construções mais conhecidas são o Pavilion of Cosmic Rays at UNAM, México (1951), a Capela Lomas de Cuernavaca (1958), o Palácio dos Desportos dos Jogos Olímpicos de 1968 ou o restaurante Los Manantiales, no México (1958) [Figura 2.14].

**Figura 2.14\_**  
esquerda, meio: Restaurante  
Los Manantiales, 1958.  
direita: Capela Lomas de  
Cuernavaca, 1958.





## Projetar com o Invisível

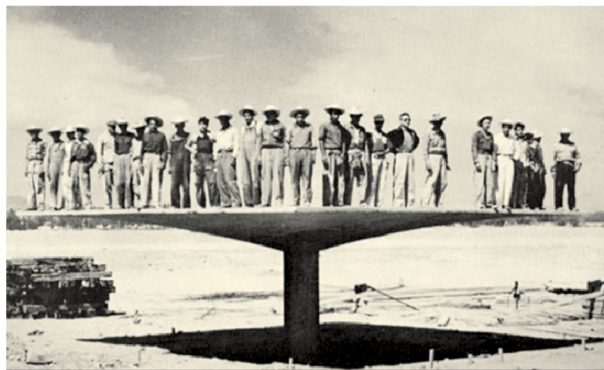
### Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto

Este último, talvez a sua obra de maior destaque, é apelidado de ‘*La Flor*’, pois a sua forma assemelha-se à de uma flor de lótus. A estrutura é formada por um conjunto de quatro “selas” que se cruzam no centro resultando daí oito abóbadas e igual número de pontos de contacto com o solo, espaçados radialmente 32m entre si. Este *form-finding* de Candela seria, em muitas das suas obras, adaptada em pequenas nuances de acordo com o programa.

Félix Candela desenvolveu também a estrutura *umbrella*. Aqui utilizou a estrutura de tipo pêndulo invertido de um guarda-chuva, onde a cobertura recolhia as águas da chuva que eram depois encaminhadas para o solo através do único elemento de suporte da estrutura. Este tipo de estrutura permitia cobrir de forma eficiente uma grande área com o mínimo material e, atualmente, é amplamente utilizada [Figura 2.15].

**Figura 2.15\_**

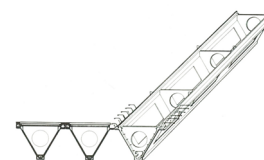
Teste da estrutura *umbrella*,  
com 25 homens em cima.



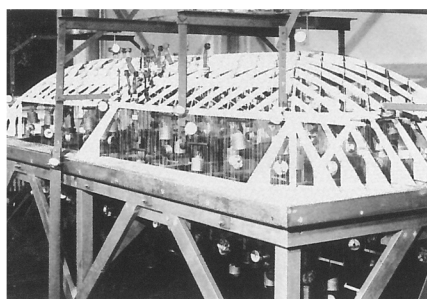
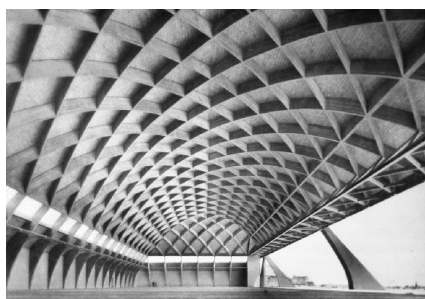
Com as formas arrojadas das suas curvas, Candela propôs uma alternativa elegante ao Brutalismo que figurava na época. Um Brutalismo provocado por um conhecimento ainda superficial das questões técnicas construtivas, em que arquitetos e engenheiros construíam massivamente como forma de garantir a segurança estrutural. Porém, com a crescente industrialização, as possibilidades técnicas de construção aumentaram substancialmente e com isso novas geometrias, técnicas e materiais eram desenvolvidos.

À semelhança dos arquitetos referidos, o italiano Pier Luigi Nervi (1891–1979), arquiteto e engenheiro, foi outro explorador do uso dos modelos físicos durante o desenvolvimento das suas estruturas, não só para entender melhor o seu funcionamento como para prever deformações da escala real. Além disso, ficou também conhecido pela invenção do *ferrocimento*. Este

novo material, constituído por betão feito com finos agregados de areia e reforçado com uma malha de aço com apenas 1 ou 2mm de diâmetro, podia ser usado na produção de elementos pré-fabricados muito finos que, posteriormente, eram instalados *in situ*, usando métodos convencionais de reforço com aço e betão (Addis, 2007). Este método seria usado no Palazzo dello Sport, construído em 1957, em Roma, onde a cúpula, cobrindo cerca de 100 metros, é constituída por módulos de *ferrocimento* em forma de “V”, com cerca de 1m de profundidade, 4,5m de comprimento e apenas 25mm de espessura nas paredes [Figura 2.16]. Entre muitas obras, Nervi aplicou as suas inovações no Orbetello Hangar, em Itália (1942) [Figura 2.17], na Iglesia San José Obrero, no México (1959), no Palazzo del Lavoro, em Turim (1961), ou no Norfolk Scope, em Virginia (1971).



**Figura 2.16\_**  
Diagrama do módulo pré-fabricado de *ferrocimento* usado no Palazzo dello Sport, 1957.



**Figura 2.17\_**  
Orbetello Hangar, 1942.  
Modelo usado na análise das deformações da estrutura nervurada.

A experimentação física como ferramenta de *form-finding* estrutural, especialmente em estruturas tridimensionais, seria igualmente explorada pelo arquiteto alemão Frei Otto e por Heinz Isler, engenheiro suíço.

A obra de Otto (1925–2015) destaca-se pela sua leveza, transparência e relação pacífica entre natureza, arquitetura e Homem, visível nas estruturas de cabos e membranas tensionadas. A dificuldade de calcular estruturas cujas formas estavam dependentes de forças aplicadas em cabos ou membranas e da rigidez dos mesmos, levava a que o seu cálculo matemático fosse praticamente impossível. Assim, a partir de 1961, Otto, no *Institute for Lightweight Structures*, fundado por si, na Universidade de Estugarda, começou a realizar uma série de experiências com o intuito de gerar, simular e visualizar o comportamento de tais formas na realidade. Nelas usou vários tipos de materiais, desde correntes rígidas, redes, tecidos

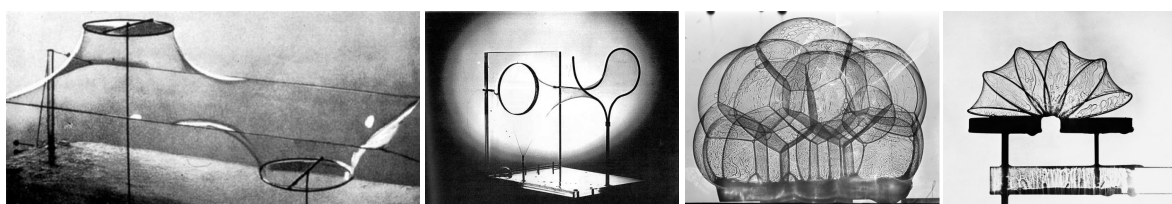
## Projetar com o Invisível

### Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto

ou película de sabão [Figura 2.18]. Destas experiências resultaram as formas das estruturas e membranas tensionadas nunca antes possíveis de ser concebidas à escala apresentada por Otto. Tais estruturas, que tinham por base as características funcionais das tendas primitivas suportadas por cabos tensionados, revelavam grande economia material e seriam aplicadas em obras como o Pavilhão Alemão para a Expo'67 em Montreal [Figura 2.19], o Estádio Olímpico de Munique (1972) [Figura 2.20] ou o Munich Zoo Aviary (1980).

**Figura 2.18\_**

Experiências com película de sabão desenvolvidas por Frei Otto.



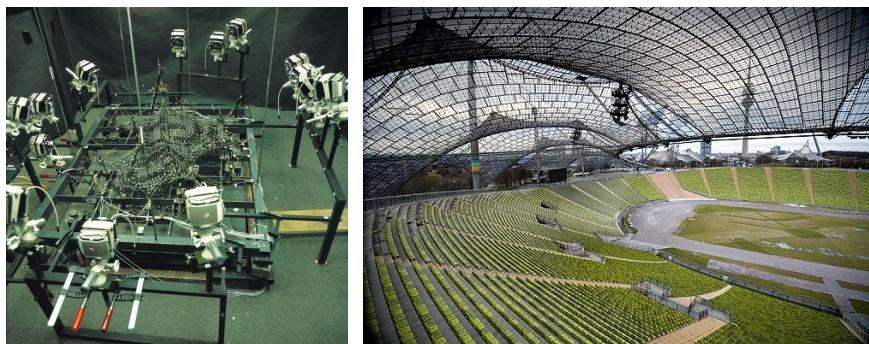
**Figura 2.19\_**

Pavilhão Alemão para a Expo'67. Forma encontrada no modelo de película de sabão.



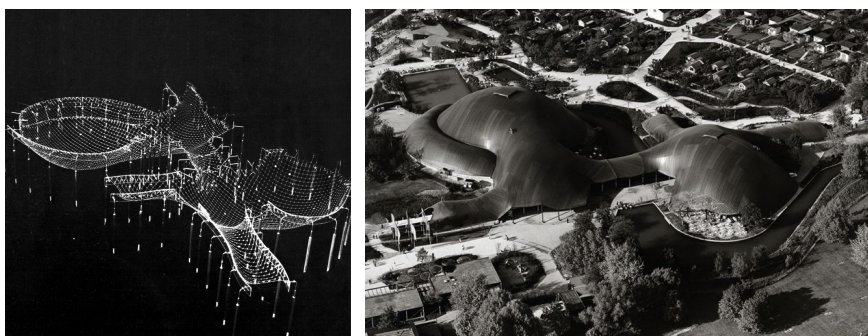
**Figura 2.20\_**

Modelo de simulação do Estádio Olímpico de Munique, 1972. Os modelos eram fotografados com câmaras de grande precisão para posterior avaliação.



Com o tempo, Otto foi apurando a sua técnica nas estruturas tensionadas construindo estruturas cada vez maiores. “O seu fascínio particular, no entanto, era com as formas geradas na natureza, sejam elas bolhas ou ramos de árvores ou flores ou ossos de animais e esqueletos.” (Addis 2007, 556).

No Mannheim Hall, em 1975, Otto voltaria a servir-se dos modelos físicos como ferramenta de *form-finding*, neste caso usando correntes penduradas num modelo à escala 1/100, a partir do qual foi calculada a geometria exata dos elementos de madeira que constituíam a malha estrutural [Figura 2.21]. A dimensão considerável da estrutura, 80m por 60m, aliada à complexidade dos elementos e incerteza dos cálculos obtidos manualmente, levaram a que a estrutura fosse submetida a uma análise computacional. A análise, levada a cabo pela empresa de engenharia ARUP, comprovou que a estrutura iria ceder em algumas partes, pelo que teve de ser reforçada pontualmente (Addis 2007). Este caso é exemplificativo de como o computador pode ser uma peça fundamental na resolução de alguns problemas mais complexos que tanto os modelos físicos como o cálculo matemático não conseguem responder na sua totalidade. Sobre esta matéria, Frei Otto (2010, 38) considera que “*pode-se pensar em tudo, pode-se calcular tudo usando o computador*”.



**Figura 2.21\_**  
Modelo de correntes  
suspensas usado no *form-  
finding* da estrutura de  
madeira da cobertura do  
Mannheim Multihalle, 1975.

Apologista da interdisciplinaridade na prática arquitetónica, Otto ficou conhecido por ter trabalhado extensivamente com engenheiros e por ter explorado o conceito de sustentabilidade, estudado já anteriormente, por Buckminster Fuller. Exemplo disso é a Arctic City (1971), um projeto de enorme escala, não construído, onde Otto juntamente com Ewald Bubner, ambicionava cobrir uma área de 288 mil metros quadrados com uma membrana pressurizada. Um pouco à semelhança da cúpula geodésica de Buckminster Fuller, esta membrana permitia a eliminação de elementos de suporte no interior e pretendia introduzir a consideração de conforto climático no espaço urbano, protegendo os seus habitantes das intempéries e das temperaturas menos agradáveis.



## Projetar com o Invisível

### Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto

Após o auge das conchas em betão, na década de 1950, e seguindo os trabalhos de Torroja e Candela, o engenheiro Heinz Isler continuou a produzir este tipo de coberturas tipo usando métodos similares aos usados por Otto no Mannheim. Isler (1926–2009) entende que “*o modelo tem a resposta para quase tudo*” (Todisco 2016, 35). O Wyss Garden Center (1961), Deitingen Service Station (1968), Truffaut Villeparisis (1977), Aichtal Outdoor Theater (1977), La Tène Tennis Center (1983) ou Norwich Sports Village Hotel (1991) são algumas das obras onde Isler aplicou o seu modelo [Figura 2.22].

**Figura 2.22\_**

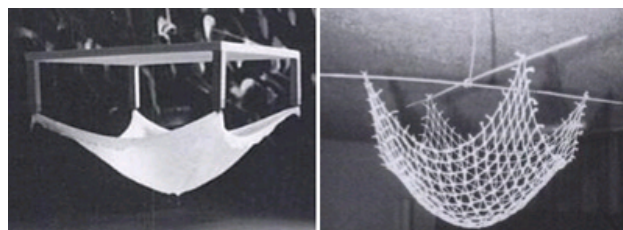
esquerda: Wyss Garden Center, Solothurn, 1961.  
meio: Deitingen Service Station, 1968.  
direita: Norwich Sports Village Hotel, 1991.



No seu processo de projeto, começava por estabelecer uma configuração adequada para a cobertura, fazendo depois uso de modelos de tecido pendurado para gerar a geometria estaticamente estabilizada da forma inicialmente idealizada. Para assegurar que o modelo preservava a geometria enquanto realizava as medições, Isler embebia o tecido em gesso líquido que, passado uns minutos, solidificava. De seguida procedia às medições e escalava os resultados que lhe davam as dimensões finais da estrutura em betão armado. Outra variante desta técnica consistia em pendurar o tecido húmido ao ar livre e deixar este congelar durante a noite [Figura 2.23].

**Figura 2.23\_**

Modelos de tecido e rede suspensas de Heinz Isler.



Paralelamente, Isler desenvolveu também um método de construção económico que permitia que a cofragem usada na construção da cobertura,

pudesse ser desmontada e reutilizada inúmeras vezes em coberturas com outros formatos e tamanhos. Apesar da eficiência historicamente demonstrada por estes modelos, o cálculo era sempre necessário na asseguuração de que as estruturas não iriam ceder nem sofrer deformações aquando da construção.

O interesse de Isler pela criação de estruturas eficientes reflete a preocupação e capacidade que, todos estes arquitetos e engenheiros, demonstraram em perceber e visualizar as problemáticas da arquitetura antevendo pelo meio alguns avanços construtivos, materiais e formais.

Os autores previamente referidos foram alguns dos mais influentes, no entanto, muitos outros os há que tentaram aproximar as matérias de desempenho aos seus trabalhos e experiências. Vimos também que apesar de alguns deles serem unicamente reconhecidos como arquitetos ou engenheiros, pela sua formação académica, método de trabalho e proximidade com a construção tornaram-nos autênticos “engenheiros e arquitetos construtores”, fazendo com que as suas denominações profissionais fossem, por vezes, confundidas.

Ainda assim e independentemente da atribuição que lhes era dada, o importante a realçar dos seus trabalhos é o valor que a colaboração e integração de conhecimentos interdisciplinares aplicados no desenvolvimento projetual ofereceu à arquitetura propriamente dita. De acordo com Álvaro Siza (2018, 117), *“a qualidade de um projeto, seja qual for a sua extensão, obtém-se pelo trabalho interdisciplinar, pela capacidade de diálogo e de coordenação, e não pelo conhecimento especializado do arquiteto para este ou aquele desempenho. É indispensável o arquiteto especialista em não ser especialista, responsável pela visão global e de relações que a arquitetura exige.”*.

Todos eles, em maior ou menor dimensão, valorizaram e aproveitaram a forma, a estrutura e a eficiência dos elementos encontrados na natureza [Figura 2.24]. A natureza é o tema projetual de fundo das suas experimentações tornando-os, também por isso, responsáveis pelo surgimento de conceitos como a otimização, a performance ou a sustentabilidade no campo da arquitetura. A maioria não conviveu sequer

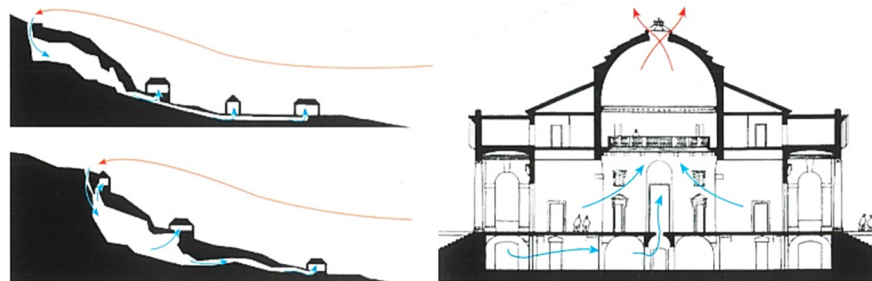
## Projetar com o Invisível

### Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto

com a grande “máquina” que viria a revolucionar a arquitetura e o mundo. Recorreram-se dos modelos físicos para testar e avaliar as suas ideias e, também por isso, os seus trabalhos incidiram maioritariamente no estudo do comportamento estrutural pois era a performance mais facilmente testada e calculada com os meios de que dispunham. Por outro lado, as suas experiências com modelos físicos são importantes pois revelam a necessidade que o arquiteto tem de visualizar as suas ideias, de materializar o desempenho do “invisível”.

**Figura 2.24\_**

As villas da região italiana de Costozza utilizam as grutas existentes no solo como forma de controlo térmico do interior das suas casas. As cavidades, resultantes da atividade romana de exploração de pedreiras ali existentes, permitem que o ar frio refresque a casa no verão e amenize as temperaturas frias do inverno através de grelhas de pedra colocadas entre os pisos. Este sistema foi explorado por Andrea Palladio na Villa Rotonda.



Concluindo, a relação entre arquiteto e engenheiro nem sempre fora de mútua colaboração, e os exemplos descritos mostram precisamente como a interdisciplinaridade produz resultados melhorados no produto final. Deste modo, caberá aos principais responsáveis do projeto decidir qual de duas vias possíveis pretendem seguir. A primeira, de separação entre especialidades, adotada ao longo da história e que se tem demonstrado incapaz de responder positivamente às exigências, ou a segunda, sinónima de integração e cooperação mútua entre os vários profissionais e que se mostra mais eficaz, vantajosa e original. “O arquiteto não é “um especialista mais”. Não é um fazedor de imagens, como por vezes se pretende. Em tempo de interdisciplinaridade compete-lhe sobretudo promover e coordenar a convergência das muitas competências que a construção de uma “obra de qualidade” envolve – objetivo não atingível por espontânea adição de saberes simultaneamente autónomos e ajustáveis.” (Siza 2018, 155).

Porque arquiteto e engenheiro têm enfatizado duas atividades profissionais autónomas e com matérias de estudo distintas é com a ajuda do computador e das tecnologias digitais associadas que tal integração se torna facilitada.

## 2.3 \_ Interferência das Tecnologias Digitais

A integração das tecnologias digitais na arquitetura veio iniciar um processo de transformação na arquitetura, alterando processos e abrindo novas possibilidades criativas. Se até então o ambiente de trabalho do arquiteto passava pelo desenho em papel e no uso dos modelos físicos na exploração e simulação das suas formas, as tecnologias digitais viriam alterar práticas processuais e transformar o seu estirador de madeira num “estirador digital” [Figura 2.25].



**Figura 2.25\_**  
Escritório de Arquitetura,  
antes e depois das  
tecnologias digitais.

Considerado por Alan Turing, como a “*máquina universal distinta que pode levar a cabo as tarefas de quaisquer outras máquinas*” (Ganshirt 2007, 189), o computador prometia resolver as questões de representação, visualização e avaliação necessárias na construção de formas cada vez mais evoluídas. Além disso, vinha preencher uma lacuna já há muito anunciada pois, segundo Kalay (2004, 63), “*a arquitetura, como forma prática de arte, tem tido a necessidade da computação – e das ajudas computacionais – desde os tempos antigos.*”.

Historicamente, é evidente a repercussão que as novas tecnologias têm tido no desenho de arquitetura, facto nitidamente visível na linguagem de edifícios como o Crystal Palace ou a Torre Eiffel [Figura 2.26]. O primeiro, construído para acolher a *Great Exhibition* de 1851, espelhou o espírito tecnológico da Idade Industrial, anunciando o futuro do aço e do vidro. O segundo exemplo, construído aquando da *Exposition Universelle* em Paris, no ano 1889, pretendia monumentalizar a arquitetura da época, mostrando a dimensão que os novos edifícios podiam atingir usando as novas tecnologias e materiais desse tempo. Atentando ambos os exemplos,



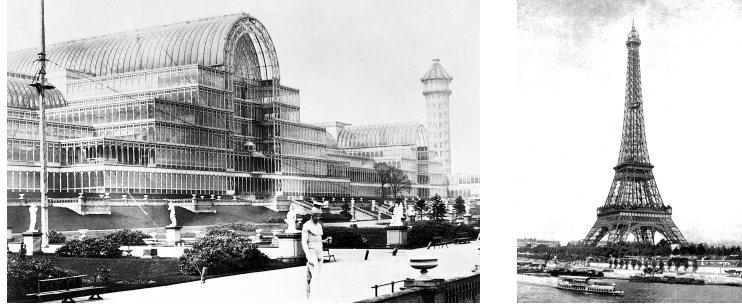
## Projetar com o Invisível

### Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto

percebemos o quanto foram importantes no anúncio e validação das novas ferramentas tecnológicas na arquitetura e no estabelecimento de novas ideologias.

**Figura 2.26\_**

esquerda: Crystal Palace,  
Londres.  
Joseph Paxton, 1851.  
direita: Torre Eiffel, Paris.  
Gustave Eiffel, 1889.



Atualmente é rara a área profissional que não depende, direta ou indiretamente, das tecnologias digitais que o computador veio introduzir e é já impossível imaginar o mundo sem a sua presença.

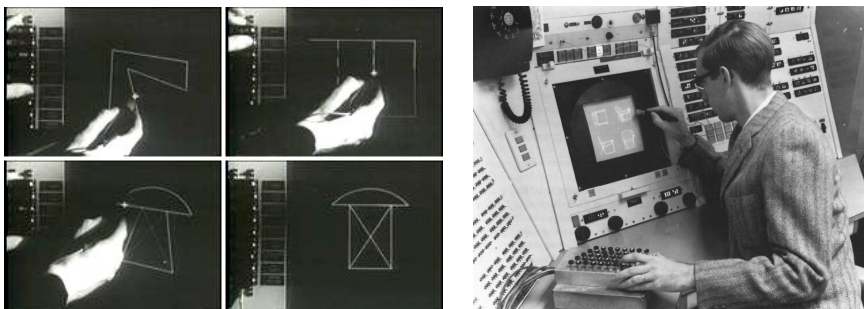
Como refere Sousa (2010, 72), “*diferentes disciplinas tendem a entender, assimilar e utilizar tecnologias de maneiras diferentes*”, deste modo, a distinção entre arquiteto e engenheiro faz-se também no que toca às novas tecnologias digitais. As ferramentas e processos analógicos de cada um deram lugar a famílias de programas distintos – o CAD e o CAE. Enquanto o CAD permite a reprodução em ambiente digital do projeto desenhado pelo arquiteto, o CAE é a ferramenta de análise digital usada pelo engenheiro. Esta divisão é mais facilmente compreendida se aprofundarmos o estudo dos processos relacionados com cada uma destas tecnologias, apresentadas de seguida.

## CAD

As tecnologias de Desenho Assistido por Computador (CAD) centram-se na utilização dos sistemas do computador na ajuda à criação, modificação, análise e automação do desenho de projeto. Por outras palavras, o sistema CAD busca a definição geométrica do desenho projetual.

Em 1963, Ivan Sutherland criou o primeiro *software* de CAD, o Sketchpad [Figura 2.27]. Além de permitir desenhar formas geométricas, através do uso de uma caneta digital, era também possível criar relações entre vários elementos do desenho e realizar a análise performativa de conceitos

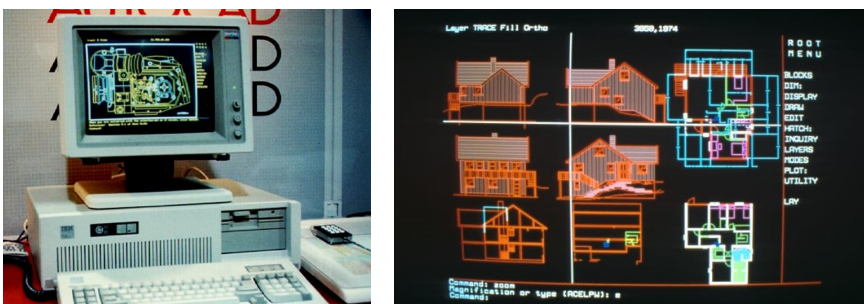
estruturais muito básicos (Peters 2018). Esta interface gráfica, desenvolvida no MIT, foi pioneira na forma de interação entre utilizador e computador, ajudando a impulsionar o desenvolvimento de interfaces gráficas melhoradas. As indústrias naval e da aeronáutica foram as primeiras a ter o contacto com esta tecnologia, devido à complexidade projetual implícita nos seus processos de conceção, desenvolvimento e fabricação.



**Figura 2.27\_**  
Sketchpad,  
Ivan Sutherland, 1963.

Um dos primeiros *softwares* de CAD a três dimensões surgiria nos anos 70 (1966–1968) por Pierre Bézier, engenheiro na empresa Renault. O Unisurf era assim desenvolvido com o intuito de facilitar o desenho e fabricação de componentes e ferramentas para a indústria automóvel (Kolarevic 2003).

Em 1982, a Autodesk introduz no mercado o AutoCAD v1.0, permitindo o acesso das tecnologias CAD ao arquiteto [Figura 2.28]. No entanto, devido à elevada dimensão, custo e exigências de ventilação dos primeiros computadores, a implementação desta tecnologia ocorreu essencialmente em grandes escritórios de arquitetura, como os de Frank Gehry, Zaha Hadid ou Norman Foster. A tecnologia só seria amplamente difundida a partir da década de 90, quando a *Windows* e a *Intel* lançaram computadores pessoais mais rápidos e acessíveis.



**Figura 2.28\_**  
esquerda: AutoCAD v1.0,  
1982.  
direita: AutoCAD v2.0,  
1985.

## **Projetar com o Invisível**

### **Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto**

O AutoCAD viria mesmo a consolidar-se como líder dos *softwares* de CAD, lançando todos os anos uma versão melhorada do seu programa. Ainda assim, surgiram no mercado outros *softwares* com grande recetividade, como o ArchiCAD, o Rhinoceros ou o CATIA. Mais recentemente, têm surgido muitos outros programas, dotando a tecnologia CAD de capacidades de desenho 2D, modelação 3D, visualização, apresentação, assim como análise e otimização do desenho.

Na verdade, o computador pode ser utilizado de diversos modos. Tendo isto em conta, Terzidis introduz a distinção entre “computação” e “computorização”. Considera que a *“computorização é automação, mecanização, digitalização e conversão (...) de entidades ou processos pré-concebidos, predeterminados e bem definidos. Em contraste, computação é a exploração do indeterminado, vago, obscuro, processos pouco claros e normalmente mal definidos.”* (2006, xi).

Esclarecendo, a computorização é a representação digital do desenho tradicional realizado através de instrumentos analógicos, como se de uma cópia digital do desenho do arquiteto se tratasse. Segundo Sousa (2010, 76), esta abordagem encara o computador como uma *“máquina de representação”*.

Por outro lado, a computação tira partido do poder de cálculo do computador para conceber e representar projeto. Consiste na exploração e geração de novas formas e neste caso, o computador pode ser considerado uma ferramenta de desenho generativo. A computação utiliza o desenho paramétrico ou o desenho algorítmico para gerar formas que resultam de parâmetros e restrições bem definidos, sendo apartir dessas mesmas imposições que o computador produz a forma resultante.

## **CAE**

Sobre o trabalho do engenheiro, Petroski entende que o mesmo se assemelha ao crescimento de uma criança, em que erra e volta a errar até aprender como se levantar, caminhar ou correr. Se na era pré-computador o trabalho de engenharia baseava-se na “tentativa e erro”, com o computador e as tecnologias CAE esta teoria evoluiu no sentido de facilitar

a tarefa de cálculo e simulação. Com o CAE, o erro deixou de ser o “desafio” e passou a ser o “proibido” (Petroski 1992, 13).

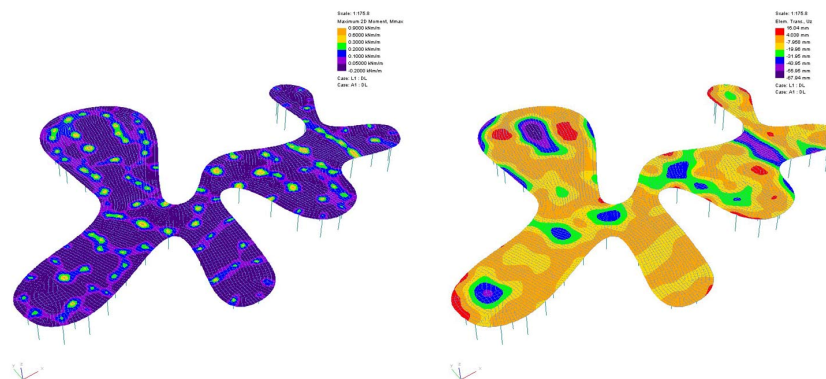
Deste modo, as tecnologias de Engenharia Assistida por Computador (CAE) ganham relevância pela necessidade de formas complexas serem simuladas, calculadas e automatizadas. Segundo Lee, as tecnologias CAE definem-se como *“o uso dos sistemas computacionais na análise de geometrias CAD, permitindo ao projetista simular e estudar como o produto se irá comportar de maneira a que o seu desenho possa ser refinado e otimizado.”* (1999, 7). O CAE mostra-se por isso uma alternativa aos métodos analíticos de simulação da performance. Os modelos físicos de Gaudí, Candela ou Otto e os cálculos complexos que as suas estruturas careceram podem, com o CAE, dar lugar a uma abordagem digital de cálculo, simulação e aprovação das suas teorias de maneira mais prática. Assim, as tecnologias CAE vêm dar uma representação gráfica ao “invisível”, possibilitando que as novas formas possam ser testadas e avaliadas mais rapidamente no ambiente digital que rodeia o arquiteto contemporâneo.

Aprofundando, das técnicas de análise mais usadas pelo CAE, destacam-se o Método de Elementos Finitos (FEM) e a Dinâmica de Flúidos Computacionais (CFD).

O Método de Elementos Finitos (FEM) consiste na representação de um domínio através das partes que o constituem – elementos finitos. Fruto da subdivisão do modelo em partes mais pequenas e do aumento da quantidade de dados a ser calculada, este método exige maior capacidade de processamento dos *softwares* e computadores. O FEM é também denominado de FEA – Análise de Elementos Finitos – e no processo de desenho de áreas de projeto, é usado para prever como um produto se comportará durante a sua utilização. Esta técnica é indicada para o estudo de vários problemas de engenharia como tensões estruturais, fadiga, deflexões, transferência de calor, fluxos de fluídos, etc [Figura 2.29]. Esta técnica encontra-se já disseminada em muitos programas de desenho e análise, como o ANSYS, COMSOL, Fusion 360 ou no Rhinoceros, com o Scan&Solve ou o *plug-in* Simscale.

**Figura 2.29\_**

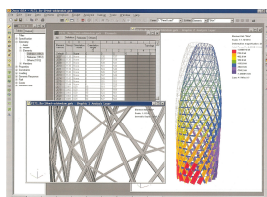
Serpentine Gallery Pavillion,  
Londres. SANAA, 2009.  
esquerda: Análise do  
momento fletor.  
direita: Análise das  
deflexões da estrutura.



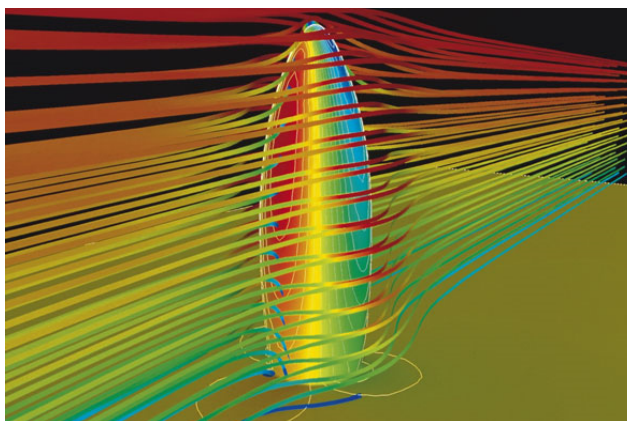
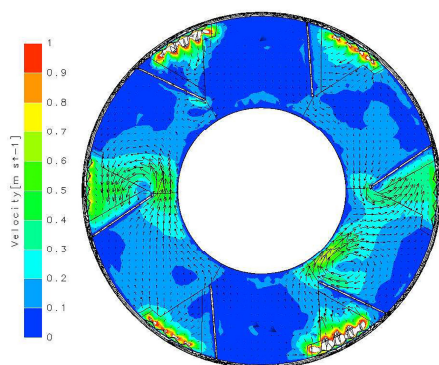
À medida que o poder computacional se torna mais acessível, outra técnica de análise digital tem surgido em força nos últimos anos, o CFD. Segundo Ali Malkawi esta técnica *“aplica técnicas numéricas para resolver equações de campo fluídos de Navier-Stokes e fornece uma abordagem para resolver as equações de conservação para massa, momentum e energia térmica.”* (Kolarevic 2005, 88). Por outras palavras, a Dinâmica de Fluídos Computacional consiste na simulação do escoamento de fluídos, através do uso de métodos numéricos computacionais.

**Figura 2.30\_**

Swiss Re, Londres.  
Foster+Partners, 2003.  
Análises FEM e CFD da  
direção e velocidade dos  
ventos ditaram a forma do  
edifício.



Esta tecnologias tem aplicações em variadíssimas áreas que apresentam aero, termo ou hidrodinâmicas, como a indústria dos transportes, a gestão de recursos hídricos e energéticos, a previsão climática ou a análise da poluição. Na arquitetura, a sua aplicação foca-se na análise das deslocações de ar e águas pluviais, ventilação natural e artificial, distribuição térmica, emissividade dos materiais de construção, propagação do fogo e fumo, difusão do som, entre outros [Figura 2.30].



Apesar da tecnologia CFD estar em crescendo, é cada vez maior o número de programas que incluem esta metodologia de análise. Atualmente está incluído em programas como ANSYS (Fluent ou CFX), COMSOL Multiphysics, XFlow CFD, Fusion360 no pacote Revit, RhinoCFD ou o EnergyPlus, que sendo indicado para aplicações mais complexas a nível energético e ambiental pode ser associado a alguns dos programas enumerados.

Dada a complexidade teórica das técnicas de análise apresentadas, as tecnologias CAE têm ainda sido pouco adotadas pelos arquitetos. Não obstante o facto destas tecnologias de análise computacional estarem cada vez mais evoluídas e concebidas para que o arquiteto possa, de forma facilitada, visualizar e otimizar os seus desenhos nos seus ambientes de desenho CAD, o arquiteto tem demonstrado pouco interesse por estas matérias, acabando ainda por relegar a análise performativa aos engenheiros de especialidade. No entanto, a escala e complexidade arquitetónicas atuais exigem aos seus responsáveis um crescente domínio dos materiais, das técnicas construtivas e da gestão projetual, que jamais poderá ser alcançada pela separação interdisciplinar e desinteresse tecnológico demonstrado até então.

### **CAM**

Dada a multiplicidade formal que estas tecnologias são capazes de produzir, torna-se igualmente necessário materializar tais formas de maneira mais precisa e eficiente quando comparado com as técnicas tradicionais.

Enquanto CAD e CAE se encarregam, respetivamente, da definição geométrica do projeto e da sua otimização performativa, cabe às tecnologias CAM a automatização dos processos de materialização. A Manufatura Assistida por Computador permite planear, gerir e controlar todas as operações relacionadas com a fabricação de componentes, através de máquinas de Controlo Numérico Computorizado (CNC). As primeiras aplicações surgiram em grandes empresas da indústria automóvel e aeroespacial, onde era requerida precisão na variabilidade e liberdade geométrica das formas dos seus componentes. O

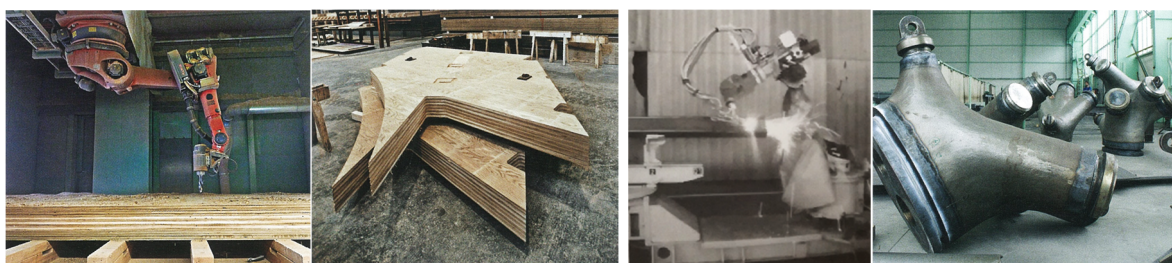


## Projetar com o Invisível

Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto

já referido *software* UNISURF, além da representação tridimensional implementou também um sistema de interação CAD/CAM, associando ambos os processos de projeção e fabricação de componentes complexos.

Através de uma interface gráfica interativa, a tecnologia CAM permite simular todo o processo de fabricação, pré-visualizando o resultado e prevenindo eventuais problemas durante a produção. Com a agilização dos processos, esta tecnologia poupa tempo e recursos e minimiza a probabilidade de erro na produção de formas complexas [Figura 2.31].



**Figura 2.31\_**

esquerda: Metropol Parasol, Sevilha. Jürgen Hermann Mayer, 2011.

Braço robótico controlado por CNC usado no corte dos elementos de madeira.

direita: The British Museum Great Court.

Foster+Partners, 2001.

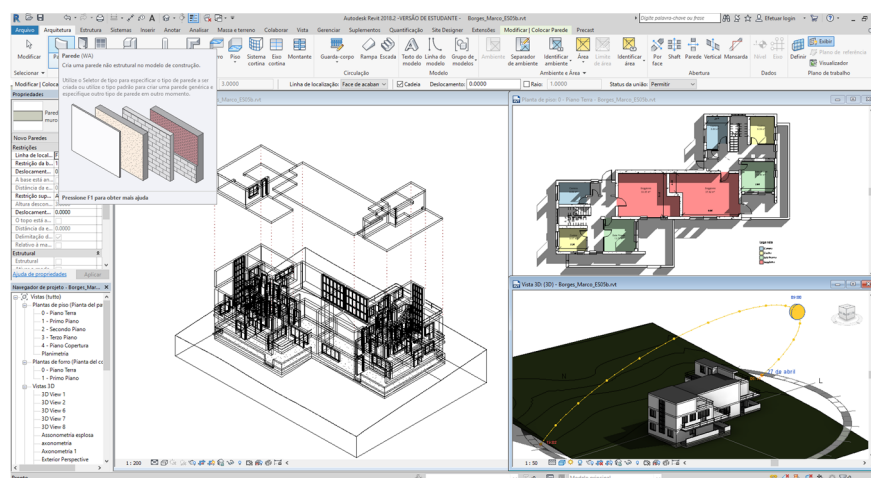
O recurso ao CAM agilizou a fabricação das conexões da estrutura, permitindo a produção de um grande número de peças, todas distintas, de forma precisa, rápida e económica.

Dada a sua estreita relação com o CAD, os programas atuais de CAM distribuem-se de duas maneiras. Como *softwares* de CAM independentes que programam diferentes máquinas e diferentes manufaturas, como o SURFCAM ou o VisualMILL. Ou enquanto aplicações integradas em pacotes de *software* maiores como o CatiaCam, o Fusion360 (AutoDesk), o BobCAD-CAM (Solidworks) ou o RhinoCAM e Kuka|prc (Rhinoceros). O Metropol Parasol em Sevilha (2011) ou o Queen Elizabeth II Great Court, no British Museum em Londres (2001), constituem exemplos de projetos que se auxiliaram desta tecnologia para a fabricação dos seus componentes.

## BIM

O *Building Information Modelling* (BIM), é uma metodologia baseada na modelação 3D que permite a conceção, representação, fabricação e gestão da construção e das infraestruturas do projeto através do meio digital. Recorrendo-se de uma extensa base de dados, permite atribuir informação detalhada a cada elemento do edifício. Por exemplo, numa parede em modelo BIM é possível atribuir informação relativa à resistência estrutural, ao custo de produção, à constituição material, entre outras propriedades.

Além disso, introduz capacidades de gestão e planeamento dos processos implicados na conceção, construção e manutenção do edifício, acrescentando uma nova dimensão – 4D – o tempo, ao processo de projeto. Mais recentemente, têm vindo a ser-lhe atribuídas outras “dimensões”, como a estimativa de custos, a sustentabilidade ou a manutenção, demonstrando a potencialidade desta tecnologia em se adaptar às novas preocupações e exigências da construção de um edifício [Figura 2.32].



**Figura 2.32\_**  
Ambiente de trabalho do Revit, da Autodesk.

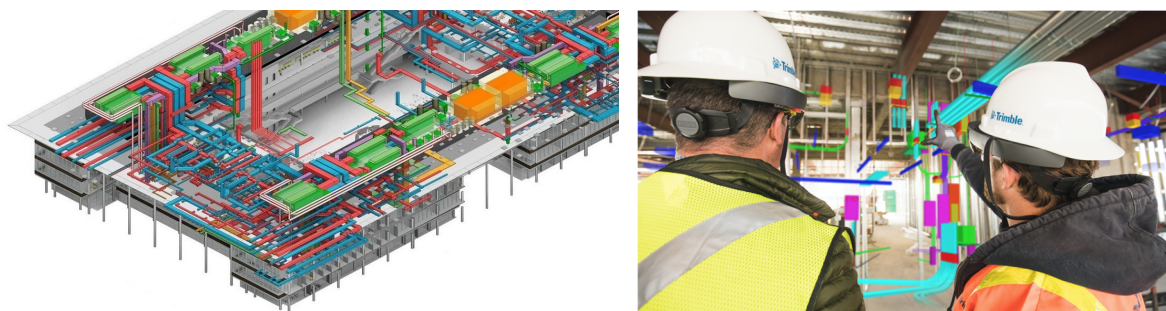
Pela interoperabilidade que oferece, permite também que os vários profissionais envolvidos possam a qualquer momento do processo de projeto visualizar e modificar informações de outras especialidades em tempo real, sem terem a necessidade de recorrer a outros *softwares* ou converter ficheiros pesados. Deste modo, toda a informação é partilhada de forma transparente, mais rápida e sem perdas de informação ou risco de erros. O conceito BIM ou, como apelida Stuart Bull “*edifício virtual*” (Schittich 2013, 112), possibilita que os projetistas desenvolvam as suas soluções construtivas com maior confiança, não apenas no que toca à sua exequibilidade como no desempenho performativo do edifício a curto, médio e longo termo [Figura 2.33].

Os primeiros programas de apoio ao BIM surgiram nos finais de década de 70, porém, só estariam disponíveis para computadores pessoais em 1984, com o ArchiCAD Radar CH (Quirk 2012). Atualmente são já muitos os *softwares* BIM, destacando-se o Revit (Autodesk), o ArchiCAD (Graphisoft), o Bentley Architecture ou o Autodesk Naviswork.



## Projetar com o Invisível

Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto



**Figura 2.33\_**

Cleveland Clinic Health Education Campus, Ohio, EUA. Foster+Partners, 2015. esquerda: Modelo BIM com infraestruturas MEP integradas. direita: Tecnologias de realidade mista, como o Trimble Connect, permitem através do uso de óculos HoloLens, projetar o modelo virtual BIM sobre o mundo real, auxiliando a construção e manutenção do edifício.

Em suma, o BIM é uma metodologia abrangente que inclui funcionalidades de desenho (CAD), de cálculo (CAE), de fabricação (CAM), assim como de planeamento e gestão de projeto. Trata-se de um processo capaz de agilizar a colaboração interdisciplinar aproximando não só, arquiteto e engenheiro, como todos os restantes especialistas envolvidos no projeto. Neste ambiente, desenho e performance encontram uma plataforma comum para o seu desenvolvimento. Em vez de se sucederem sequencialmente no tempo, interagem colaborativamente neste ambiente.

*“Nenhum Da Vinci poderia hoje, por si só, dominar a extensão e complexidade de saberes implícitos no projeto de Arquitectura e na sua concretização.”*

(Siza 2018, 47)

Como vemos, as constantes revoluções industriais e avanços tecnológicos atraíram a arquitetura para um processo de permanente evolução. Estabeleceram-se novas tendências materiais, novas técnicas construtivas e a imposição das tecnologias digitais na sociedade levou à criação de formas mais complexas e de novos métodos de trabalho. Atualmente, as formas arrojadas resultantes das experiências de Gaudí, Candela, Otto ou Isler podem ser rapidamente concebidas em ambiente digital, possibilitando a exploração de formas mais complexas que as maquetes e as fórmulas não conseguem captar. As formas de dupla curvatura, para além da esfera, é um desses exemplos, que apesar de conhecida não era usada devido à dificuldade de desenho, cálculo e execução.

Ainda assim, e não obstante o facto destas tecnologias apresentarem interfaces cada vez mais intuitivas e de fácil manuseio e aprendizagem pelos vários profissionais, elas não dispensam o conhecimento básico dos seus processos [Figura 2.34]. Questões, por vezes, apenas interiorizadas pela experimentação prática e analógica. Para conseguir tirar o máximo partido destas ferramentas, o arquiteto continua a necessitar do esquisso e o engenheiro de compreender as lógicas matemáticas por detrás da análise da performance. Assim, ao pensar com o computador, o arquiteto não poderá descurar a importância que o desenho analógico desempenha em todo o processo. O papel é a base do desenho e, como refere Siza, “*o papel invadiu a nossa vida e as nossas casas. (...) e todos nós, nem mesmo o computador o dispensa.*” (2018, 35).



**Figura 2.34\_**

Hartford Civic Center, EUA.  
Vincent Kling, 1973.

Após avaliação, os investigadores descobriram que o colapso da arena, em 1978 e cinco anos após a sua construção, se deveu à leitura errada, por parte da equipa de arquitetura, dos dados produzidos pelo *software* de análise digital.

Neste contexto, o computador tem de ser visto como uma ferramenta de trabalho, tal como as cartas solares ou a régua de escalas o foram, que necessita de alguém capaz de interpretar e introduzir os comandos adequados conforme as circunstâncias de projeto. Numa primeira fase, aquilo que ele acrescenta é a capacidade de processar a informação de forma eficiente e automatizada, poupando esforços de representação, cálculo e tempo que poderá ser empenhado noutros momentos de conceção e desenvolvimento do projeto. De acordo com Terzidis (2003, 6) o computador “*não erradica a imaginação humana, antes estende as suas potenciais limitações...fornece os meios para a exploração, experimentação e investigação numa realidade alternativa.*”. Assim, a interferência das tecnologias digitais no desenho de arquitetura pode também fomentar a exploração alargada das noções conceituais estabelecidas.



## **CAPÍTULO 3 \_ PROJETAR COM O INVISÍVEL**



### 3.1\_ Arquitetura e Performance

Como vimos, os temas de desempenho, sejam eles quais forem, desempenham um papel determinante no modo como a arquitetura é sentida e vivida. Elas constituem fatores de percepção, conforto e apropriação tão importantes quanto a própria definição física dos espaços ou a materialidade das suas superfícies. Um determinado espaço transmite proximidade e conforto não apenas pelo que vemos visualmente, como por aquilo que não vemos ou tocamos. A arquitetura sente-se também no intangível e invisível, ainda que por vezes nos seja impercetível.

Porque a arquitetura é feita para o Homem, é a ele que a arquitetura deve servir. Assim, o termo “projetar com o invisível” vai de encontro com as ideias enunciadas, e propõe a consideração dos fatores performativos, invisíveis, na conceção de um projeto de arquitetura que procura satisfazer as suas necessidades. Numa sociedade cada vez mais tecnológica, cabe às tecnologias digitais promover esta integração e otimização dos fatores performativos no processo de desenho do arquiteto.

Vitrúvio, no seu tratado, *De Architectura*, apresentou a tríade vitruviana onde anunciou os três elementos fundamentais que a seu entender deviam constar em qualquer obra arquitetónica de qualidade. A *Firmitas*, referente à estabilidade e solidez; a *Utilitas*, que diz respeito à função; e a *Venustas*, alusiva à beleza da obra. Se nas últimas duas, as ideias são facilmente entendidas e têm sido abordadas na arquitetura praticada ao longo da história, já a *Firmitas* tem sido encarada como necessidade implícita à construção e por isso pouco refletida e verdadeiramente compreendida. Neste seguimento, considera-se que as questões performativas anunciadas nesta dissertação podem ser incluídas na valência *Firmitas*. Como o invisível proporciona, em última instância, maior harmonia entre Homem, obra construída e lugar, acaba também por promover a estabilidade e solidez arquitetónica que a *Firmitas* evoca.

Retomando os temas iniciais do desenho de projeto e da sua performance, percebemos o quanto as ferramentas, analógicas e digitais, têm influenciado a reflexão de novas considerações no desenho de arquitetura.

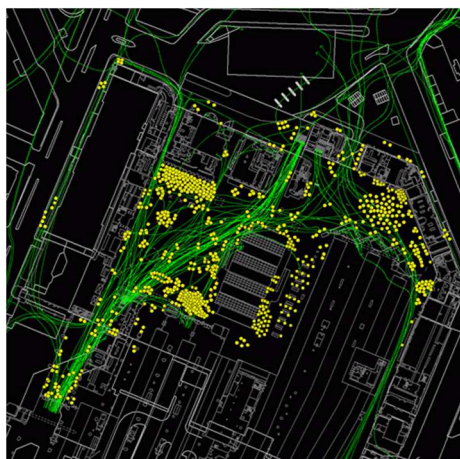
Durante séculos a arquitetura tem-se preocupado essencialmente com os aspetos funcionais, estéticos e estruturais das construções, relegando para segundo plano as questões de desempenho e eficiência que abonam na garantia de firmeza e coesão. Questões que têm parecido “invisíveis” aos olhos do arquiteto.

Assim, da já anunciada necessidade de aproximação entre desenho e performance, ou arquiteto e engenheiro, os novos meios digitais possibilitam uma abordagem alternativa para a incorporação das questões performativas no projeto, promovendo a integração interdisciplinar no projeto de arquitetura.

Por outro lado, constitui uma abordagem emergente na qual a performance pode guiar e influenciar o desenho, desafiando o modo como a conceção do ambiente construído é encarada. Assim, o desenho performativo deixa de ser guiado pela intuição e passa a depender do desempenho das questões performativas, agora visualizadas no digital. A integração da performance na arquitetura foi amplamente explorada por Branko Kolarevic e Ali Malkawi, no livro *Performative Architecture* (2005), num trabalho que emergiu da aparente dificuldade de integração entre desenho e análise nas ferramentas digitais. Já Fasoulaki (2008) considera que o desenho performativo evolui de uma abordagem meramente estética para uma abordagem em relação ao comportamento dos edifícios, em que o edifício é guiado pela forma como funciona, e não pela sua aparência. Com a consideração dos temas de performance, a questão do “o que faz” sobrepõe-se à fórmula do “como é”.

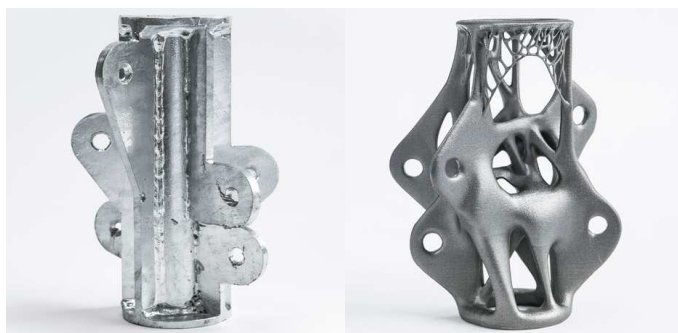
A introdução da performance no desenho de projeto acelerou o desenvolvimento de novos métodos digitais de análise e simulação que atualmente estão à disposição do arquiteto na maioria das plataformas de representação de desenho em ambiente digital. Sob a forma de pacotes, programas autónomos ou *plug-ins* específicos para determinado programa, estes *softwares* analisam vários temas sobre o desempenho e o seu estudo pode fazer-se a diferentes escalas e graus de aprofundamento. Seja a análise específica de um espaço singular ou de uma porção de cidade, é

possível simular dinâmicas, diagnosticar problemas e procurar soluções para os mais variados aspetos que constituem performance [Figura 3.1].



**Figura 3.1\_**  
Análise dos fluxos de saída dos passageiros da Victoria Station, Londres. Tim Stonor, Space Syntax.

Na análise performativa do projeto, uma das mais valias que estes *softwares* possibilitam na procura da solução é a possibilidade de otimização e geração da forma. De acordo com Burry (2012), na arquitetura o otimizar refere-se à aptidão pelo propósito, a um estado especial de equilíbrio e à economia de meios. Esta busca pela solução mais favorável ou desejável é um processo comum a muitos sistemas e processos do mundo natural, daí que a sua origem esteja na Biologia, ainda no século XIX. O termo surge, inevitavelmente, associado ao extremos da maximização e da minimização, pois uma otimização pode resultar tanto na maximização de determinado objetivo como na minimização de algo [Figura 3.2].



**Figura 3.2\_**  
Protótipo de um elemento estrutural otimizado e desenvolvido pela ARUP. esquerda: Protótipo metálico original. direita: Protótipo otimizado impresso.

Como se viu no capítulo 2.2, na falta deste tipo de tecnologias, o cálculo, recálculo e simulação em modelos físicos foi o modo, que os arquitetos



### Projetar com o Invisível

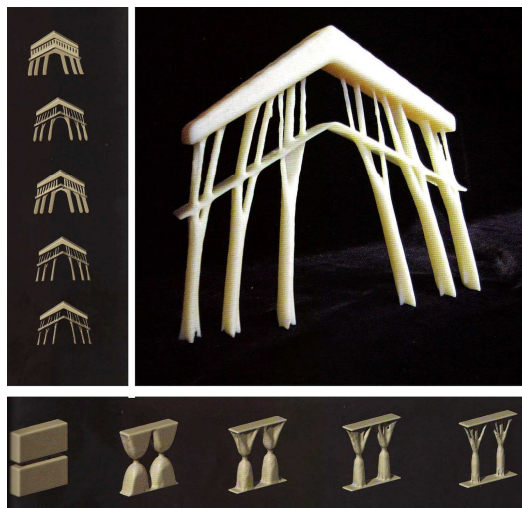
#### Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto

encontraram, de visualizarem as suas ideias para, de seguida, otimizarem as suas construções de acordo com as suas próprias exigências. Outras vezes, arquitetos e engenheiros aprenderam através da “tentativa e erro”. Recorreram ao conhecimento empírico, apoiado nos erros e sucessos do passado, para melhorar os seus desenhos e cálculos o que, de certo modo, constitui também um processo de otimização.

Em ambiente digital, a otimização faz recurso de processos como a análise de elementos finitos e, matematicamente, podem ser de dois tipos: estocásticos ou determinísticos. No método estocástico a sequência combina uma componente aleatória ou probabilística com um processo seletivo, fazendo com que apenas certos resultados do aleatório possam prevalecer. Aqui, o mesmo processo executado repetidamente nas mesmas condições não chega, necessariamente, ao mesmo resultado. O método baseia-se na aleatoriedade e pode ser ilustrado pelo lançamento de um dado. Já nos métodos determinísticos de otimização não há aleatoriedade, os valores são considerados precisos e cada estado e operação determina exatamente o próximo.

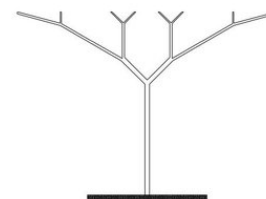
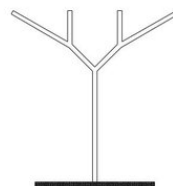
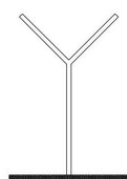
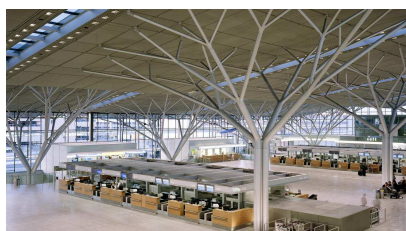
**Figura 3.3\_**

Processo de geração de forma, com várias iterações aplicadas.



Segundo Monks (1999, 69), “o papel da otimização num sistema de desenho é encontrar a configuração no desenho do espaço que melhor corresponda aos objetivos de desempenho desejados.”. Recentemente, a otimização na arquitetura tem sido maioritariamente usada como uma ferramenta de *form-finding*. O desenho otimizado transforma-se assim em

desenho generativo, onde a forma otimizada é gerada a partir de restrições impostas ao projeto. Quanto maior o número de restrições, mais específico e particular será o resultado, pois implica um maior número de interações [Figura 3.3 e Figura 3.4].



Assim, a otimização ajuda o arquiteto a assegurar o cumprimento de objetivos e especificidades muito relevantes na arquitetura atual. Num planeta cada vez mais condicionado pela atividade humana, é crescente a proliferação de recomendações impostas aos edifícios e às suas infraestruturas. Deste modo, a otimização aliada à consideração das questões de desempenho possibilita uma resposta mais adequada às exigências relacionadas com o desempenho, vivência e sobrevivência do Homem e da arquitetura.

Como fomos vendo ao longo dos temas abordados, os processos naturais surgiram sempre como pano de fundo, tanto nas experiências com modelos físicos como na fundamentação das lógicas de funcionamento do digital ou na inspiração concetual e ideológica. Tem servido de inspiração ao arquiteto e de fonte de recursos materiais à arquitetura.

*“O século atual iniciou com uma descoberta inesperada: a terra é frágil. Portanto, a arquitetura deve aprender a respirar com o ritmo da Terra.”*

Renzo Piano (Schittich 2013, 67)

Ao longo dos séculos, o Homem tem continuado a consumir os recursos naturais, produzindo consistentemente mais “coisas” e a gerar cada vez mais resíduos e poluição (Schittich 2013, 125). Simultaneamente, as sociedades evoluíram colocando de lado a preocupação para com o meio natural, tomando-o como um bem adquirido e fonte de recursos inesgotável.

**Figura 3.4\_**

Terminal 3 do Aeroporto de Stuttgart. Von Gerkan, Marg & Partners, 2004.

A forma em árvore surgiu do método de otimização estrutural evolutiva (ESO), semelhante ao crescimento dos ramos de uma árvore.

## Projetar com o Invisível

Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto



**Figura 3.5\_**

Frei Otto sobre o modelo da Arctic City, 1970. A proposta de cidade para 40.000 pessoas ambicionava contrariar as temperaturas polares do ártico, regulando o ambiente interior que era providenciado por recursos existentes no lugar. Pretendia também separar os fluxos de carros e pessoas por diferentes níveis.

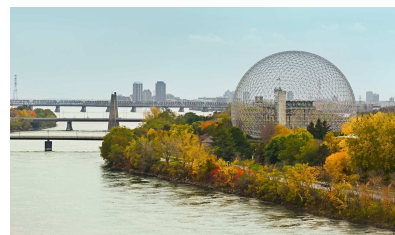
Na arquitetura, a tendência tem sido idêntica, construindo-se usando os recursos naturais num processo unidirecional sem se considerar o que restará para as gerações futuras. Hoje, sabe-se que os edifícios contribuem para cerca de metade das emissões mundiais de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), sendo por isso essencial repensar o modo como se constrói (Schittich 2013). Frei Otto considera que *“as condições ambientais alteradas de hoje não podem mais ser dominadas com os recursos arquitetônicos do passado. A relação entre biologia e construção precisa agora de esclarecimento devido a exigências reais e práticas. Nunca antes o problema do meio ambiente fora uma ameaça à existência. Com efeito, é um problema biológico.”* (1971, 7).

Conscientes do *“problema biológico”* que a continuidade de tais práticas acarretaria no futuro do planeta, já no passado, alguns arquitetos, procuraram enfatizar a relação entre o construído e o meio natural em alguns dos seus trabalhos, principalmente à escala urbana.

A já referida Arctic City, de Frei Otto [Figura 3.5], remete para um modelo previamente apresentado e introduzido por Buckminster Fuller. Fuller (1895–1983) foi um dos primeiros arquitetos a enfatizar a dimensão energética na sustentabilidade, tendo desenvolvido as cúpulas geodésicas, estruturas leves, normalmente metálicas, em que o ambiente interior era controlado pelo homem. Com a idealização destas estruturas, propôs uma resposta sensibilizadora para os perigos da poluição que despoletavam problemas de saúde pública crescentes. Um dos exemplos construídos deste conceito foi a Biosfera de Montreal, no Québec, pela altura da mostra da Expo’67 [Figura 3.6].

**Figura 3.6\_**

esquerda: Cúpula geodésica sobre Manhattan por Buckminster Fuller, 1960. A cúpula com 3 km de diâmetro regularia a temperatura interior e reduziria a poluição do ar, reduzindo custos com a regulação térmica e criando melhor atmosfera. direita: Biosfera de Montreal.

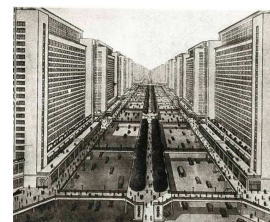


Também Le Corbusier (1887–1965) tinha já, em 1930, idealizado um futuro mais sustentável na sua proposta da Ville Radieuse [Figura 3.7]. Caracterizada pela organização funcional dos seus blocos de habitação de alta densidade, esta proposta revelou a preocupação em criar bem-estar aos moradores da cidade, fosse na presença de espaços verdes entre os blocos, na abundância de luz solar, como pela minimização de ruído, dada pela separação vertical entre automóveis e peões. A par de uma visão futurista, ambos os exemplos, revelaram uma intenção de controlo sobre a performance do espaço habitado e a preocupação para com o natural, características de uma arquitetura com consciência de sustentabilidade.

A ideia do sustentável viria estimular um maior equilíbrio entre necessidades humanas, recursos materiais e futuro. Para além das regulamentações locais de edificação, as construções, começaram também a ser sujeitas a avaliação no que toca ao seu desempenho energético e material. Com isso surgiram novas estratégias de controlo e de avaliação das construções – as certificações energéticas – cuja relevância tem-se intensificado desde a criação do primeiro sistema de certificação, o *Building Research Establishment (BRE)* em 1990 (Peters 2018).

Estas certificações autenticam os edifícios consoante o seu desempenho energético e têm em consideração fatores como os gastos de energia, a gestão de transportes, o tratamento de águas residuais e pluviais, a gestão dos resíduos, as emissões poluentes, a ocupação do solo, as fontes de energia renovável, entre outros. Dependendo do grau de eficiência é atribuída uma classificação, dentro do próprio sistema de certificação. A título de exemplo, o sistema de certificação LEED, um dos mais usados a nível mundial, possui os critérios *Certified*, *Silver*, *Gold* e *Platinum*. Assim edifícios diferentes podem partilhar a certificação LEED, mas possuírem critérios diferentes.

As certificações por norma, estão organizadas por área geográfica, podendo apresentar parâmetros relativamente diferentes consoante o local da edificação. Ainda assim, todas têm como denominador comum a obtenção de edifícios mais sustentáveis e em alguns países é já obrigatória a certificação de edifícios de função específica, como escritórios ou



**Figura 3.7\_**  
Ville Radieuse, Le  
Corbusier.

## Projetar com o Invisível

### Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto

hospitais. Além das já referidas BREEAM e LEED, a nível internacional existem também a Passivhaus, Effinergie, Minergie ou GreenStar. Em Portugal, são exemplo LiderA, Domus Natura ou SBTool, e desde Janeiro de 2009 que a certificação energética é obrigatória em todo o tipo de edifícios.

No que toca ao ato de projetar propriamente dito, estas questões surgem já integradas nos ambientes de trabalho usados normalmente pelo arquiteto [Figura 3.8]. Seja na “rede” BIM ou em programas de CAD e CAE com capacidade de análise performativa, surgem incluídas bases de dados com relatórios de exigências dos vários sistemas de classificação ambiental e energética. Assim, é possível, em qualquer fase do projeto e em tempo real, analisar o desempenho das várias componentes performativas e avaliar o nível de conformidade do edifício para com uma certificação específica [Figura 3.9].

**Figura 3.8\_**

Seleção e relação entre algumas das ferramentas de análise da performance atualmente disponíveis.

Vermelho: acústica.

Vermelho escuro: materiais e ciclo de vida.

Laranja: energia.

Amarelo: exposição solar.

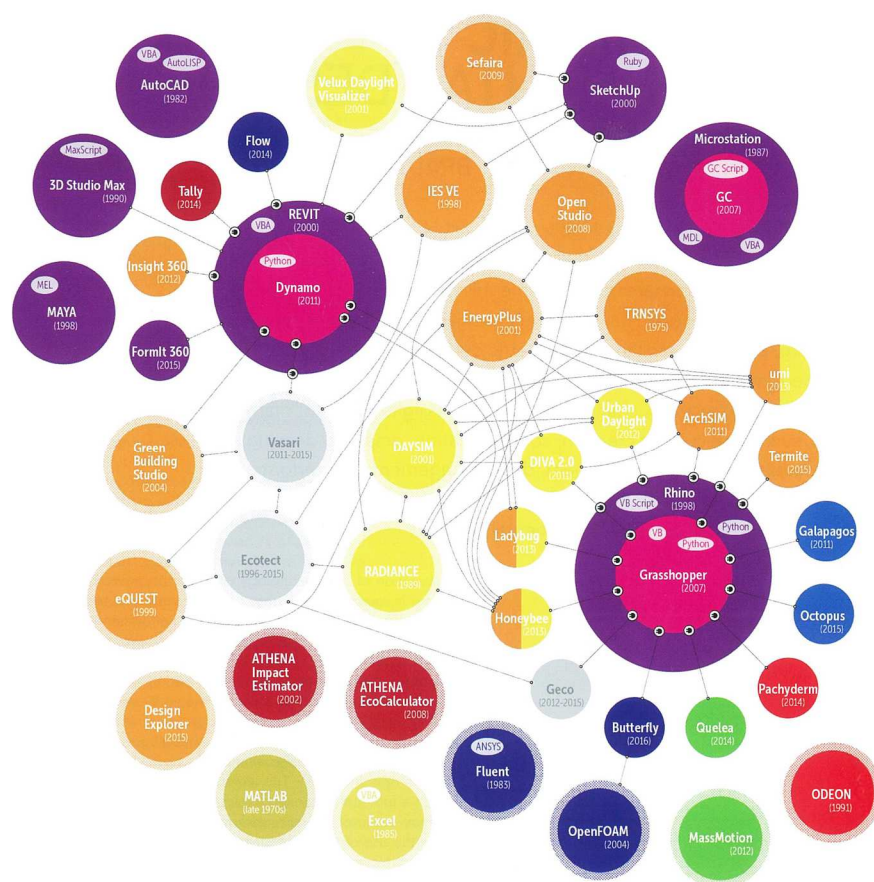
Verde: fluxos de pessoas.

Azul: dinâmica de fluídos.

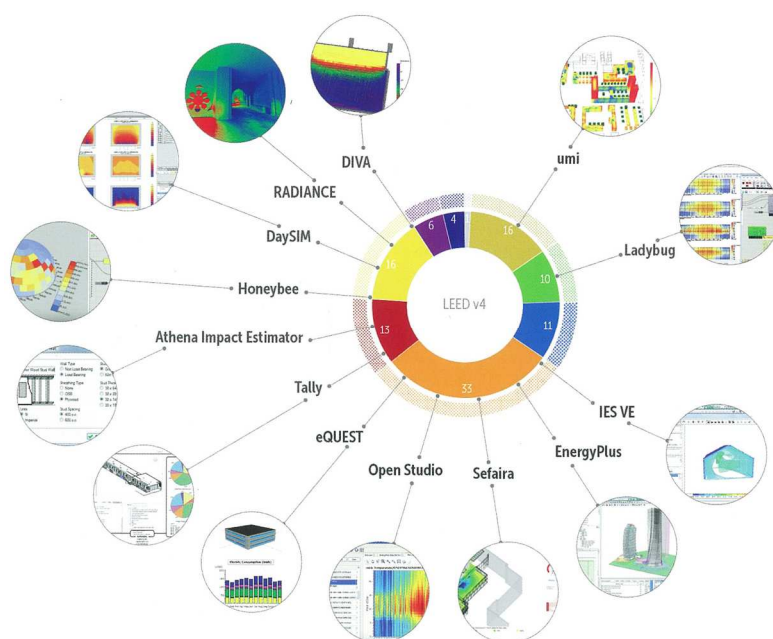
Roxo: CAD.

Cor de rosa: *plug-ins* de desenho paramétrico para CAD.

Cinzento: *software* descontinuado.

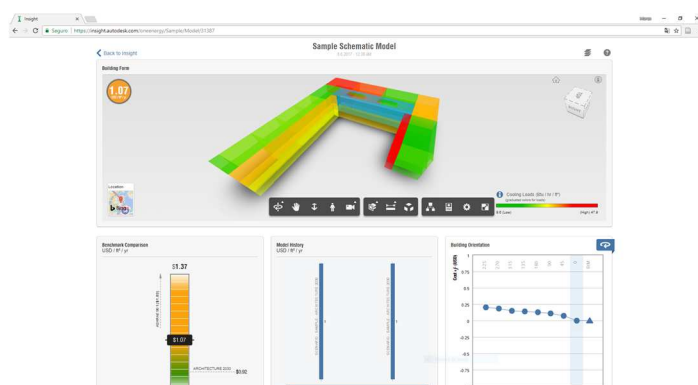






**Figura 3.9\_**  
Algumas das ferramentas digitais de análise performativa associadas ao sistema de certificação LEED.

A recente Insight360 é uma destas ferramentas [Figura 3.10]. Integrado em *softwares* da Autodesk, como o Revit ou o FormIt 360, permite a visualização do desempenho das várias performances diretamente no ambiente de modelação. Além disso, através da criação e reencaminhamento para um link *url*, esta ferramenta inclui um visualizador tridimensional do modelo e cria gráficos e tabelas sobre o comportamento energético e ambiental da proposta, que podem ser consultados instantaneamente. Oferece também a possibilidade de guardar e partilhar todo o histórico de avaliações realizadas de modo a que o arquiteto possa a qualquer fase do projeto rever e partilhar valores com os restantes intervenientes no projeto. Deste modo, o arquiteto pode guiar o seu desenho de acordo com as exigências de determinada certificação.



**Figura 3.10\_**  
Programa Insight 360.

## Projetar com o Invisível

### Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto

Por outro lado, as certificações tornam-se também fatores económicos significativos na arquitetura, pois “*uma vez que um edifício é avaliado, por exemplo, por métodos internacionais de avaliação ambiental, como LEED ou BREEAM, o seu valor no mercado imobiliário aumenta.*” (Schittich 2013, 63). Por tudo isto, as certificações têm-se tornado fatores de grande relevância à creditação de qualidade a uma obra [Figura 3.11].

**Figura 3.11\_**

The Crystal (Siemens),  
Londres. Perkins+Will &  
Wilkinson Eyre, 2012.  
Primeiro edifício no mundo  
a receber a mais alta  
acreditação de ambos os  
sistemas BREEAM  
(Outstanding) e LEED  
(Platinum). Emite menos  
70% de CO<sub>2</sub> que outro  
edifício equivalente no  
Reino Unido.



Numa aproximação mais ideológica e com as devidas diferenças, quase podíamos entender estas recomendações ambientais como novos tratados de uma arquitetura sustentável. Se outrora os Tratados de Vitruvius (*De Architectura*, século I a.C.), de Leon Battista Alberti (*De Re Aedificatoria*, século XV) ou a Carta de Atenas (1933), forneceram diretrizes ideológicas ao arquiteto de como guiar e encarar o espaço, acabaram também por influenciar o desenvolvimento concetual dos projetos, refletido na linguagem arquitetónica das suas épocas. Deste modo, e embora estas certificações introduzam nuances um pouco diferentes ao projeto, elas acabam por influenciar o modo como o arquiteto projeta porque também os métodos, ferramentas e preocupações são diferentes.

Por outro lado, constata-se que a arquitetura focada nestas preocupações, vem de certo modo promover a reformulação dos conceitos pré-estabelecidos e enraizados na arquitetura das últimas décadas, como a máxima introduzida no século XIX, “*form follows function*”. Se Louis Sullivan considerava que a forma era sempre o espelho da função do edifício, ao projetar com a performance, a forma relaciona-se também com as componentes performativas que o constituem. Como descreve Brady Peters (2018, 145), “*tipicamente, quando confrontado com um problema de desempenho complexo num projeto, a BuroHappold implementará uma*

*abordagem de projeto paramétrico para gerar e analisar uma série de desenhos de construção. A geometria e o desempenho dessas opções podem ser visualizados, o que dá aos arquitetos e engenheiros conhecimento do que funciona e do que não funciona, e a relação entre forma e desempenho.”*. Deste modo, a forma acaba por resultar também da eficiência e desempenho da performance, transformando a máxima modernista de Sullivan num novo princípio – *“form follows efficiency”* – também apelidada por Michael Hensel de *“form follows performance”* (2013, 57).

Em suma, os recentes avanços tecnológicos criaram espaço para uma abordagem mais integrada entre desenho e performance. Ao projetar com o desempenho o arquiteto tem a oportunidade de ajustar as suas ideias iniciais às necessidades reais do Homem e do lugar, daí resultando construções mais eficientes e estimulantes. Atualmente, desenhar arquitetura é muito mais do que organizar espaços de forma coerente. Por outro lado, as preocupações com a sustentabilidade do planeta vieram imputar ao arquiteto maior responsabilidade por aquilo que projeta. Assim, usando as ferramentas digitais de que dispõe e o conhecimento teórico acumulado ao longo dos séculos, cabe-lhe desenhar com a performance, otimizando a relação entre Homem, construído, e meio ambiente que o rodeia. Nunca como hoje, fora tão fundamental e acessível “projetar com o invisível”.





## 3.2 \_ Projetar Com

Para uma melhor clarificação das possibilidades atuais de abordagem do “invisível” através das tecnologias digitais, de seguida serão aprofundadas três preocupações performativas. Nestes estudos, para além de se fazer uma breve referência aos métodos e ferramentas de análise empregues ao longo do tempo, aprofundaremos a análise de um caso de estudo exemplificativo do processo onde apresentaremos o seu desenvolvimento, realçando a forma como estas performances podem integrar ativamente no processo de projeto.

Na impossibilidade de estudar todas os requisitos funcionais de forma eloquente, selecionaram-se três temas que entendemos pertinentes e essenciais na asserção desta ideia do “projetar com o invisível”. Temas performativos que se debatem com as preocupações perante:

- As Forças
- O Sol
- O Som

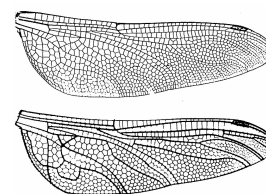
### 3.2.1 \_ As Forças

*“Ou por aves de que as asas imitam pontes (ou terá sido o contrário?)”*

(Siza 2018, 137)

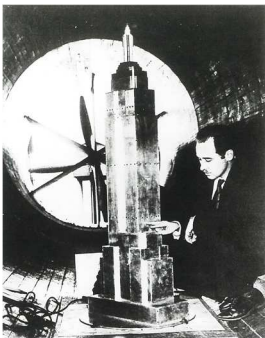
Estrutura é sinónimo de suporte, de sustentação e de simplicidade. Ela apresenta variadas ordens, seja física, molecular, musical, social, lógica. Plantas, animais, matéria e material, tudo aquilo que nos rodeia, até mesmo o próprio homem e a água que o constitui, possuem estrutura estando, por isso, sujeitas à ação de forças [Figura 3.12].

Na arquitetura, a estrutura está inevitavelmente presente e assume um papel preponderante no desenho de um edifício. Independentemente do programa, da escala ou da localização, toda a construção edificada a possui. Desde a tenda à cabana primitiva ou do templo romano ao arranha-



**Figura 3.12\_**  
Asas de libélula.

céus. A estrutura e a resposta que esta dá perante as forças é um dos fatores fundamentais que influenciam a forma e o comportamento de um edifício. Para Cecil Balmond, engenheiro de estruturas na ARUP até 2010, “*a representação mais simples de um elemento estrutural é a linha.*” (2002, 315), ideia que podemos ver refletida no sistema construtivo Dom-Ino de Le Corbusier.



**Figura 3.13\_**

Teste em túnel de vento a modelo físico do Empire State Building, New York. Shreve, Lamb & Harmon, 1931.

Todo o edifício sofre a ação de forças às quais a sua estrutura tem de responder por forma a manter a integridade da construção. Estas forças estruturais podem ser distinguidas como estáticas ou dinâmicas. Segundo Fasoulaki (2008), as forças estáticas são aplicadas lentamente na estrutura e possuem um estado estável, enquanto que as forças dinâmicas são aplicadas subitamente e não apresentam um estado estável, pois a sua magnitude, localização e direção mudam rapidamente. Aprofundando, as forças estáticas subdividem-se entre cargas mortas, como o peso dos elementos estruturais, e cargas vivas, como o mobiliário ou o peso dos ocupantes e elementos naturais, como a neve. Já as forças dinâmicas diferenciam-se entre cargas de impacto, como uma explosão ou um sismo, e cargas contínuas, como a ação dos ventos [Figura 3.13].

Geralmente, o estudo destas forças é associado à tarefa do engenheiro de estruturas. Mas, por natureza, o comportamento estrutural é também uma preocupação intrínseca à formulação da ideia por parte do arquiteto, como provam a diversidade de estudos e experiências conduzidos ao longo da história por arquitetos e engenheiros. Não é mentira que, por comparação direta com o arquiteto, o engenheiro possui mais conhecimentos sobre o assunto e tem um maior domínio sobre as ferramentas de cálculo, pois essa é a sua tarefa; mesmo assim, a perceção estrutural, ainda que empiricamente, é algo que vigora na formulação concetual do arquiteto.

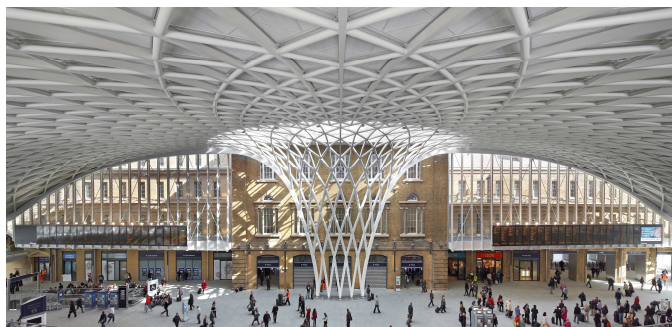
Como se discutiu no capítulo 2.3, recentemente, têm surgido muitos programas de cálculo estrutural, que de forma mais ou menos simplificada, permitem a qualquer arquiteto aprofundar e desenvolver uma intuição estrutural apoiada numa análise gráfica a partir do modelo 3D. Deste modo, algumas destas ferramentas surgem já integradas em programas de apoio ao BIM, como o Revit ou o ArchiCad, em programas CAD, como o

Rhinoceros, sob a forma de *plug-ins* como o Kangaroo ou o SmartForm, ou em pacotes específicos de análise estrutural como o ANSYS.

Nesta condição, o arquiteto pode explorar métodos de geração de forma a partir de critérios de integridade estrutural. Um pouco à semelhança de Otto ou Isler, as formas podem ser geradas, visualizadas e analisadas quanto ao seu desempenho, mas agora em ambiente digital.

Atualmente, muitos são os exemplos que se destacam pela resposta às forças estruturais refletindo-se no próprio desenho da estrutura resultante. Alguns dos mais marcantes são o ROLEX Learning Centre, em Lausanne (2010), o British Museum Great Court, em Londres (2001), a King's Cross Station, em Londres (2012), o Meiso no Mori Crematorium, no Japão (2006), o Metropolitan Opera House, em Taiwan (2016) ou o Terminal 3 do Aeroporto de Stuttgart (2004) [Figura 3.14].

Nesta dissertação, analisaremos o caso específico do Qatar National Convention Centre que apresenta uma forma bastante singular resultante da valorização do comportamento estrutural no processo de projeto.



**Figura 3.14\_**  
esquerda: King's Cross Station, Londres. John McAslan, 2012.  
direita: Rolex Learning Centre, Lausanne. SANAA, 2010.  
baixo: Metropolitan Opera House, Taiwan. Toyo Ito, 2016.

#### Qatar National Convention Centre



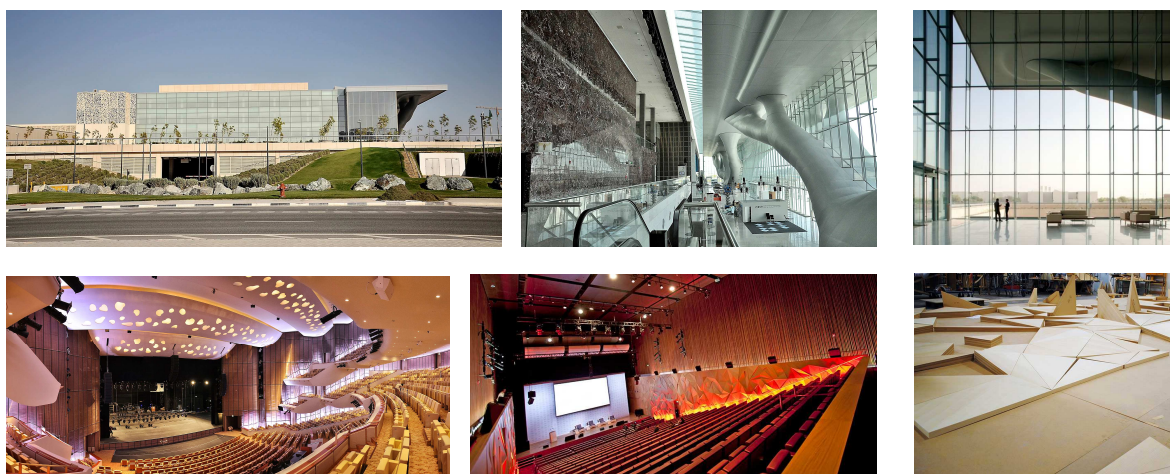
Local	Doha, Qatar
Autores	Arata Isozaki & Associates, RHWL Architects (Arquitetura), Mutsuro Sasaki, Buro Happold (Engenharia), Baytur Construction (Construção), Victor Buyck Steel Construction (Fabricação e Construção da fachada)
Área Total	200.000 m <sup>2</sup>
Custo	1.05B €
Data de Conclusão	Dezembro de 2011
Tempo de Construção	27 meses
Ferramentas digitais utilizadas	Rhinoceros, SmartForm, ANSYS
Certificações	LEED Gold

A seguinte análise baseia-se maioritariamente nas descrições do desenvolvimento projetual dadas por Shrikant Sharma, diretor técnico da equipa SMART, que podem ser encontradas em alguns dos artigos que surgem referenciados ao longo da análise.

O Qatar National Convention Centre está inserido na *Qatar Education City*, um complexo de 14 quilómetros quadrados implantado na cidade de Doha. Ocupa um lote com 200.000 metros quadrados e destacam-se 3 áreas distintas: o centro de convenções, o centro de exposições e um parque de estacionamento de apoio a todo edifício.

O edifício tem cerca de 150.000 metros quadrados de área útil e conta com uma sala de conferências tipo teatro com 4.000 lugares, um auditório com 2.300 assentos, 3 auditórios de três andares de plateia perfazendo um total de 9.000 lugares, e 52 salas de reunião flexíveis que podem acomodar vários eventos. Além disso, dispõe de 3.100 metros quadrados de área de

exposição externa, 40.000 metros quadrados de superfície de exposição distribuídos por 9 salas, capazes de acolher uma conferência ou banquete até 10.000 pessoas, e foyers de exposição, salas VIP, suítes, mesas de registo e uma sala de conferências com capacidade para 7.000 jornalistas. No interior não existem elementos estruturais para além das paredes dos vários volumes que formam as salas. A entrada é feita por um grande *foyer* de receção que abrange toda a largura e altura da fachada do edifício e que permite a ligação axial ao volume do centro das exposições. A distribuição vertical pelos quatro andares do edifício é assegurada através de escadarias e escadas rolantes. O estacionamento faz-se a vários pisos por baixo do edifício e tem capacidade para mais de 3.000 automóveis e 40 autocarros (*Design Build Network* 2010) [Figura 3.15].



Com 250m de comprimento e 115m de largura, três dos quatro pisos do volume do centro de convenções destacam-se de um pódio com 420m por 175m, que abrange o piso do rés-do-chão e parte do estacionamento. O nosso estudo centrar-se-á na composição orgânica de troncos entrelaçados que se estende pelos 20m de altura da fachada deste volume.

A sua forma é exemplo de uma fusão harmoniosa entre arquitetura, estrutura e simbolismo [Figura 3.16]. Inspirada na planta da sidra, antigo ícone árabe de conhecimento, crescimento e estabilidade, é o resultado de um trabalho de otimização estrutural só viável através do uso das ferramentas digitais e da colaboração entre as várias equipas envolvidas no projeto.

**Figura 3.15\_**

Alçado lateral, interior e auditórios, onde foram aplicados painéis de madeira acusticamente ajustados às exigências sonoras dos respetivos espaços.



## Projetar com o Invisível

Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto



**Figura 3.16\_**

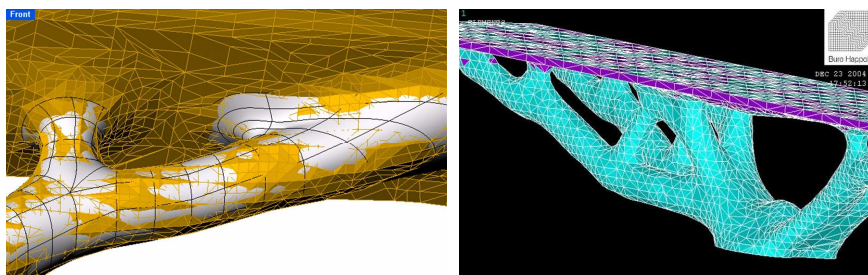
Planta da sidra, típica do deserto do Qatar.

Historicamente é o ponto de encontro de poetas e estudiosos da cultura qatar e símbolo de vida no deserto.

A natureza exata da forma em árvore pode parecer arbitrária mas está longe de o ser. Os troncos foram criados usando um método de otimização conhecido por otimização estrutural evolutiva (ESO) desenvolvido por Arata Isozaki e pelo engenheiro de estruturas Mutsuro Sasaki. Segundo Burry (2012), engenheiro de estruturas, este processo de análise de elementos finitos (FEA), consistiu em retirar progressivamente, a um bloco hipotético de metal virtual, material de lugares onde não existia tensão estrutural até um ponto em que a estrutura residual usasse o mínimo material de modo eficiente. Neste processo o topo da árvore foi restringido a permanecer perfeitamente plano assim como estabelecida a existência de dois apoios no solo, espaçados cerca de 100m entre si. Deste processo resultou uma forma orgânica semelhante à planta da Sidra. No entanto este procedimento não tinha em conta os desafios de engenharia e de fabricação associados a uma estrutura desta dimensão e complexidade.

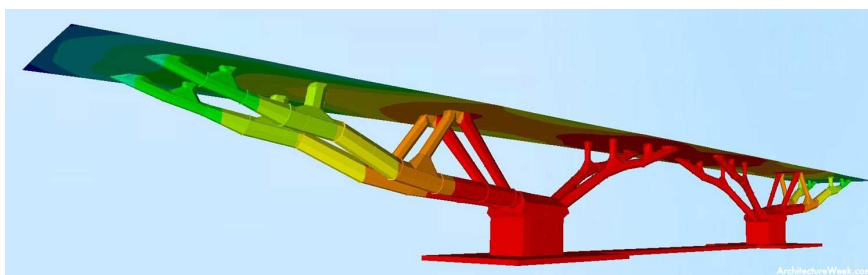
A passagem da forma pura ao artefacto construído, coube à equipa de especialistas da SMART (*Software Modelling Analysis Research Technologies*) da empresa de engenharia BuroHappold, que aprofundou a otimização integrada para a estrutura, incorporando novas restrições relacionadas com a geometria, rigidez estrutural e fabricação. Shrikant Sharma, refere que o papel da equipa no projeto foi o de “*resolver a geometria e a estrutura interna de forma a garantir que ela mantivesse a sua forma orgânica assegurando, ao mesmo tempo, que era estruturalmente eficiente e edificável.*” (Smith 2008).

Do modelo tridimensional recebido de Isozaki, a equipa começou por simplificar e racionalizar a geometria de curvas complexas, em Rhinoceros [Figura 3.17]. Esta geometria era apenas a “pele” externa da árvore no final, já que as cargas estruturais seriam suportadas por uma subestrutura de membros de aço que a equipa teria de calcular. Deste modo, a estrutura divide-se em dois componentes principais: a forma curva da pele exterior e um núcleo estrutural interno de seção octogonal.



**Figura 3.17\_**  
Racionalização do modelo tridimensional de Isozaki. A simplificação geométrica agilizaria os processos de desenho, fabricação e montagem, permitindo manter a orgânica da geometria inicial.

Este núcleo central precisava de ser eficiente no uso de material e efetivo no suporte em todos os pontos. Segundo Sharma (Smith 2008), a equipa queria *“que o esqueleto ficasse o mais próximo possível da pele, para garantir que a estrutura fosse eficiente e usasse a menor quantidade de aço possível”*. A forma do núcleo deveria aproximar-se da forma circular mas facilitar a articulação angular entre peças evitando um número muito grande de conexões complexas. Assim, graças a uma rigorosa otimização geométrica foi possível manter as chapas do núcleo octogonal o mais próximas possível da superfície dos painéis exteriores, mantendo simultaneamente o perfil totalmente plano das chapas de aço, com espessuras máximas de 60mm [Figura 3.18]. Outro fator importante era a largura e inclinação variável do núcleo à medida que os ramos cresciam. Para garantir um espaço consistente entre a estrutura e a pele, a estrutura octogonal afunila à medida que vai da base à cobertura, assegurando um suporte consistente e sem deformação por tração dos painéis metálicos exteriores (Lane 2009). Neste processo a equipa usou o seu *software* SmartForm, para encontrar a linha central através do modelo 3D usando uma fórmula que permitiu garantir uma distância uniforme entre o esqueleto estrutural e a forma livre da pele externa.



**Figura 3.18\_**  
Núcleo estrutural da árvore, otimizado pela equipa da BuroHappold.



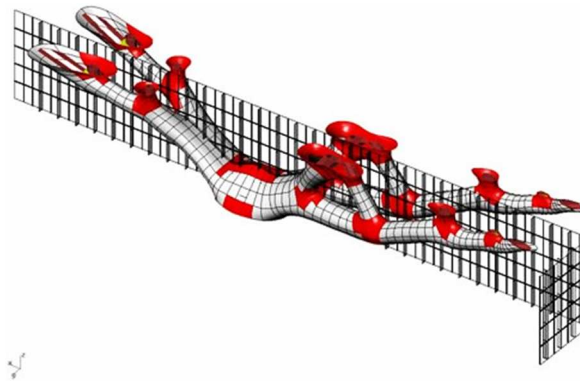
## Projetar com o Invisível

Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto

De acordo com Shrikant Sharma (Lane 2009), um dos maiores desafios do projeto foi a minimização do número de painéis de dupla curvatura da pele exterior da árvore. Se algumas partes da estrutura poderiam ser resolvidas com painéis de curvatura simples, outras partes, como os “nós”, exigiam placas de dupla curvatura de maneira a manter as formas orgânicas da árvore. Os responsáveis pelo desenho e construção, SMART e Victor Buyck respectivamente, constataram que um painel de metal com curvatura dupla poderia custar até quatro vezes mais do que um painel de curvatura simples (Duesing 2009). Através do SmartForm e do Rhinoceros, a equipa pôde rapidamente analisar a composição topológica dos milhares de painéis metálicos, percebendo que na maioria das ocorrências, a curva secundária efetuava um movimento muito ligeiro. Assim, a equipa determinou um conjunto de curvas de forma a subdividir a estrutura em regiões que poderiam ser facilmente aproximadas à curvatura simples. Quando possível, as linhas divisórias ocorriam onde a curvatura da estrutura da árvore mudava, de modo que as placas vizinhas pudessem ser dobradas numa só direção, continuando a formar uma curva suave juntas.

**Figura 3.19\_**

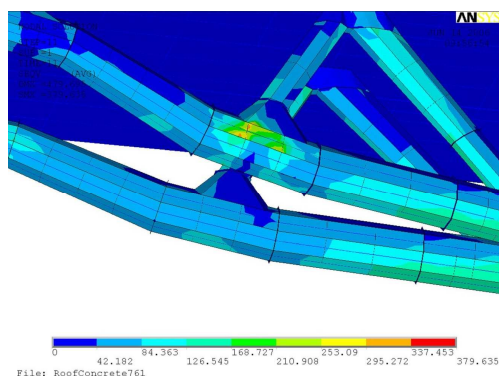
A vermelho estão identificadas as áreas a receber os painéis de dupla curvatura.



A nova proposta resultou num total de 4.700 painéis de aço resistentes à corrosão, 70% com curvatura simples e apenas 30% com curvatura dupla. Os painéis de dupla curvatura foram colocados apenas onde eram absolutamente necessários, quando dois ramos se encontram ou nas extremidades das árvores, tanto nas duas bases onde as peças são muito grandes como junto à cobertura, onde as peças são bastante pequenas [Figura 3.19]. Sharma (Smith 2008) admite que “a diferença é muito subtil,

*no entanto foi um desafio de programação”, o qual permitiu cumprir com o orçamento. A espessura das placas, com 6mm e reforçadas com costelas de aço na parte traseira de maneira a assegurar a geometria das peças, resultou também de um trabalho de otimização de modo a minimizar as cargas sobre a estrutura.*

Segundo Susan Smith (2008), a relação entre a árvore e a construção exigiu igual atenção, pois a fachada de vidro dividia a árvore em duas partes, o que impunha vários desafios em termos de tolerância de movimentos e do controlo de gradientes térmicos. Além disso, a enorme cobertura, de 250m por 30m, constituída por barras de aço com 60mm de espessura e uma camada de 200mm de betão, colocava toda a estrutura sobre grande carga estrutural. De acordo com Lane (2009), a mínima deformação seria suficiente para quebrar a longa fachada de vidro, marcada pela alternância de vidro de 800mm e 180mm a cada dois metros da fachada. De acordo com Burry (2012), a avaliação através do *software* ANSYS, de análise de elementos finitos, determinou a colocação de isolamento, nas duas metades internas que ajudam a estrutura a suportar as elevadas diferenças de temperatura entre o interior acondicionado e o clima quente exterior, além da instalação de juntas de expansão estrategicamente colocadas que permitem que a pele se mova de forma independente do núcleo central [Figura 3.20]. Com o mesmo intuito de reforço da estrutura, os pontos de contacto da árvore com o solo seriam reforçados com um enorme bloco de betão também ele encoberto pela pele exterior que nestas zonas chega a ter 7m de diâmetro face aos 4m dos ramos junto da cobertura.



**Figura 3.20\_**  
Análise térmica da estrutura da fachada realizadas no programa ANSYS, a partir do modelo paramétrico 3D.

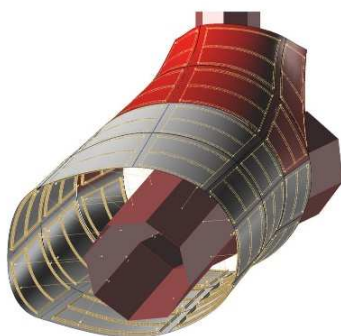
### Projetar com o Invisível

#### Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto

A fabricação e transporte dos elementos metálicos foi outro fator com grande implicação no processo de conceção e planeamento da estrutura. Apesar do construtor estar sediado na Bélgica, a fabricação dos componentes realizou-se na Malásia, condicionando o tamanho dos elementos que teriam obrigatoriamente de caber em contentores marítimos com 12m de comprimento. Como refere Sharma (Duesing 2009), a equipa não queria um grande número de peças pequenas, pois queriam um encaixe perfeito do núcleo quando ele fosse montado no local. O trabalho de otimização ditou que as pequenas secções nos topos dos ramos seriam fabricadas como peças únicas. Já as intermédias seriam divididas em duas partes e as secções maiores, perto da base, em quatro secções. Simultaneamente, tinham também de assegurar o acesso e manutenção da estrutura a longo prazo. Deste modo, decidiram fabricar as faces horizontais e verticais dos elementos octogonais com maior espessura e, com menor, as faces diagonais (Smith 2008). Nestas últimas, poderiam mais facilmente perfurar aberturas permitindo o acesso manual em obra e sem comprometer a rigidez estrutural. De acordo com Sharma (Duesing 2009), devido à complexidade formal de todas as peças, a fabricação foi realizada através de máquinas CNC, usando um ficheiro enviado pela equipa da BuroHappold, o que garantiu extrema precisão não só no processo de fabricação como na montagem [Figura 3.21].

**Figura 3.21\_**

Fabricação de um dos “nós” da árvore apartir do seu modelo digital.



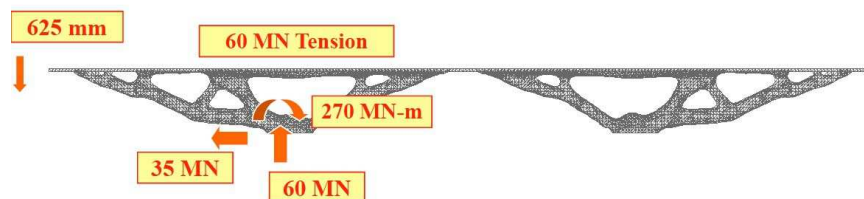
Porque cada elemento era único e tinha as suas próprias especificações de dimensão, fabrico e montagem, a equipa recorreu à modelação digital 3D durante todo o processo. Deste modo, todos os elementos puderam ser desenhados, analisados, alterados e programados num sistema automático.

Através da criação de um sistema de marcas e numeração, o modelo virtual permitiu também uma melhor gestão do fabrico e montagem dos milhares de peças. Apenas alguns desenhos convencionais 2D do núcleo estrutural foram produzidos apartir do modelo tridimensional. E excetuando alguns desenhos gerais, apenas desenhos 3D foram usados na produção dos painéis exteriores. A complexa inter-relação entre o esqueleto estrutural e a pele exterior exigia um modelo paramétrico no qual todos os componentes pudessem ser individualmente identificados e interrogados por *software* de análise. Assim, o Rhinoceros foi usado em praticamente todas as fases do processo de projeto desta estrutura, incluindo o pré-processamento do modelo inicial, a suavização da superfície, o mapeamento da estrutura de reforço, a otimização da curvatura dos painéis, o planeamento eletrónico e a preparação da fabricação digital (Liddell 2012). O *software* ANSYS complementou com a análise da forma em árvore, o mapeamento da estrutura do núcleo e outras análises térmicas e estruturais.

A construção da estrutura mostrou-se igualmente desafiante, já que segundo Robert Obbard, da empresa Victor Buyck, “*montar o teto a 30m de altura teria custado uma fortuna (...) Seriam precisas 104 torres de apoio*” (Lane 2009). Assim a equipa optou por construir a estrutura no chão e colocá-la em posição usando apenas 46 torres. A estrutura do telhado foi o primeiro elemento a ser montado, sendo construído em dois grandes segmentos no solo, apartir do aparafusamento no local das várias seções de chapa de aço. As forças de tração da estrutura foram unidas e minimizadas através do uso de 76 barras de alta resistência (Lane 2009). De seguida, ergueram-se as torres temporárias em redor das seções da estrutura e fixados elevadores mecânicos ao topo. As duas seções do telhado foram elevadas e fixadas na posição final, onde funcionaram como estrutura de elevação dos ramos.

Segundo McKay (2012), os topos da cobertura foram posicionados 625mm mais altos do que o centro de maneira a contrariar o peso próprio da cobertura nas laterais da fachada [Figura 3.22]. Seguiu-se a aplicação de uma camada de 200mm de betão e a fixação dos painéis de revestimento inferiores.

**Figura 3.22\_**  
Diagrama das forças aplicadas à estrutura.



A instalação dos ramos fez-se de cima para baixo e contrariamente ao usual, só no final foram realizadas as fundações dos dois núcleos de betão. Os painéis foram depois colocados nos suportes para o efeito, devidamente ajustados de modo a garantir a nivelação com os painéis vizinhos e soldados em conjunto para um acabamento perfeito. A construção terminou com a pintura da estrutura com várias demãos [Figura 3.23].



**Figura 3.23\_**  
Fase de construção da estrutura dos ramos e dos painéis exteriores. No total foram usadas cerca de 4.350 toneladas de aço.

O QNCC foi também concebido com foco na sustentabilidade, de acordo com o sistema de certificação LEED, sendo-lhe atribuído o critério *Gold*. Possui soluções inovadoras em questões como o consumo de água ou energia e é 32% mais eficiente quando comparado com edifícios do género que não fazem uso destas inovações tecnológicas. Para isso, em muito contribui a instalação de 3.500 metros quadrados de painéis solares, na cobertura, que fornecem cerca de 12,5% da energia total utilizada pelo edifício. Além disso, foram instalados sensores de ocupação, iluminação LED de baixo consumo, monitores de dióxido de carbono e sistemas de ar condicionado zoneados, permitindo o arrefecimento apenas nas áreas necessárias (*Design Build Network* 2010).

É interessante perceber como a forma orgânica inicial de Arata Isozaki evoluiu, ao longo do processo de projeto, num sentido de simplificação e materialização sem perder a sua essência original. Este caso de estudo demonstrou também, a presença ativa que a performance, neste caso as forças estruturais, adquire não só na fase de conceção e representação formal, como na racionalização, análise, planeamento e construção. Daí denota-se a interdisciplinaridade que o projetar com o invisível suscita em todo o desenvolvimento do trabalho e apartir do momento em que é considerada desde a fase inicial.

Pelo meio, “interferem” as tecnologias digitais que, neste caso específico, possibilitaram a concretização de uma forma tão abstrata quanto difícil de conceber com o recurso às técnicas tradicionais de análise performativa. Em suma, ao encarar a performance como uma ferramenta de projeto, o arquiteto é, de certa maneira, guiado também pela própria ferramenta, daí surgindo novas possibilidades de desenho.

“I was impressed by the way Isozaki went back to basic elemental forms.”

Robert Venturi (New York Times 1986)



### 3.2.2 \_ O Sol

*“A LUZ é quantificável e qualificável. Seja com as tabelas de Bernini ou Le Corbusier. Seja com a bússola, as cartas solares ou o fotómetro. Seja com maquetes á escala, ou com os perfeitíssimos programas de computador que já estão no mercado. É possível controlar, domar e dominar a LUZ. Tendo o homem como medida, pois é para ele, para o homem, que criamos a Architectura.” (Baeza 2011, 17)*

O Sol é algo que, excluindo raras exceções, nos surge todos os dias e em qualquer lugar do planeta. E ainda que intangível, é a sua luz que nos possibilita a visibilidade diurna. Sem a luz e temperatura que irradia não existiria vida. Pensar com o sol tem sido um assunto abordado desde os nossos primórdios, como controlo da passagem do tempo, como forma de orientação ou enquanto ferramenta auxiliar ao cultivo e pastagens [Figura 3.24]. Também na arquitetura, a luz tem sido fundamental na formulação do espaço. Da arquitetura Grega e Romana à arquitetura moderna, ou mais recentemente, na arquitetura sustentável, a luz tem modelado as formas construídas e impondo, ao arquiteto, novas estratégias de desenho. Le Corbusier realçou o papel vital da exposição solar na arquitetura referindo que a *“arquitetura é o jogo magistral, correto e magnífico de volumes reunidos em luz. (...) A história da arquitetura é a história da luta pela luz.”* (2006, 13).

À semelhança das forças, a relação com o sol é uma das questões performativas mais abordadas no desenvolvimento de um projeto, ainda assim, a sua exploração guia-se maioritariamente pela intuição no processo de projeto. Desde os primeiros anos da faculdade que o estudante de arquitetura aprende noções solares como a orientação, os panos de vidros, as sombras, o sobreaquecimento ou o encadeamento, mas a sua exploração não evolui para lá dos conceitos básicos [Figura 3.25].

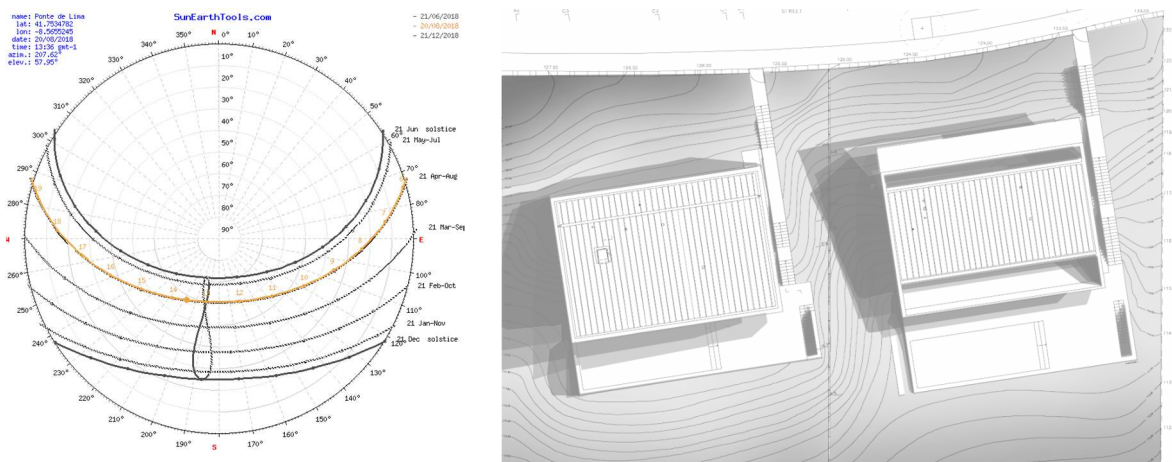


**Figura 3.24\_**  
Calendário Solar, na Piazza  
Vecchia, Bérghamo.



## Projetar com o Invisível

### Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto



**Figura 3.25\_**

Duas habitações unifamiliares, Ponte de Lima. Eduardo Souto Moura, 2002.

esquerda: Carta Solar do local.

direita: Estudo solar realizado manualmente a partir da carta solar.

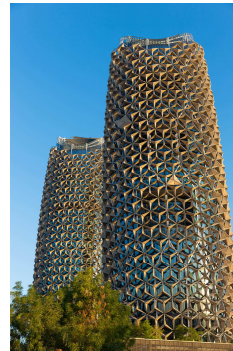
Exercício realizado para a unidade curricular de Geometria, do 1º ano da FAUP.

Na verdade, a exposição solar influencia não só o edifício, como a sua área envolvente ou os seus ocupantes. Aumentando o uso eficiente da luz do dia e dos níveis de iluminação natural, o uso de sistemas mecânicos e ativos como o ar condicionado, diminuem, proporcionando uma consequente diminuição dos gastos energéticos. De igual importância é a contribuição da luz natural para a sensação de conforto do homem, pois o seu humor, motivação, concentração e bem-estar aumentam consideravelmente.

Consciente disto, o arquiteto tem assistido, ao longo dos últimos anos, e com o avançar das tecnologias digitais, ao surgimento de ferramentas que permitem simular e visualizar instantaneamente aquilo que outrora se fazia recorrendo a cartas solares desenhadas dispostas sobre a folha de papel. Programas como o Rhinoceros ou o Revit possuem ferramentas de análise de fácil utilização e aprendizagem que permitem calcular as incidências solares em períodos específicos, avaliar os gastos energéticos ou potenciar através da otimização, possíveis ganhos ou perdas que poderão resultar de uma alteração formal do projeto. No caso específico do Rhinoceros e do Grasshopper, são exemplos *plug-ins* como o DIVA, o SmartForm ou o Ladybug e Honeybee.

Atualmente, diríamos que praticamente todo o projeto de arquitetura tem em conta esta preocupação solar, no entanto, é nos projetos de maior escala que esta performance adquire maior consideração, seja pela exigência energética que a escala exige, seja pelas crescentes regulamentações energéticas impostas.

Neste seguimento, o caso de estudo explorado será o edifício GLA, também conhecido por London City Hall, por retratar de que modo a consideração pela ação do sol foi fundamental na forma e no desempenho da proposta final. Ainda assim existem muitos outros casos onde a forma do edifício resulta de uma clara preocupação solar como são exemplo, o Swiss Re, em Londres (2003), o 8 House, em Copenhaga (2009), as Torres Al Bahar, em Abu Dhabi (2012), o VIA 57 West, em New York (2016) ou o Coco, Grove at Grand Bay, em Miami (2016) [Figura 3.26].



**Figura 3.26\_**  
esquerda: VIA 57 West,  
New York. BIG, 2016.  
direita: Al Bahar Towers,  
Abu Dhabi. Aedas  
Architects, 2012.  
baixo: Coco, Grove at Grand  
Bay, Miami. BIG, 2016.

## Projetar com o Invisível

Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto

### London City Hall, Foster + Partners

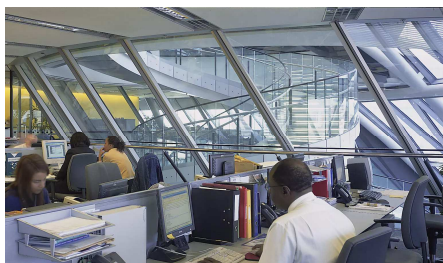
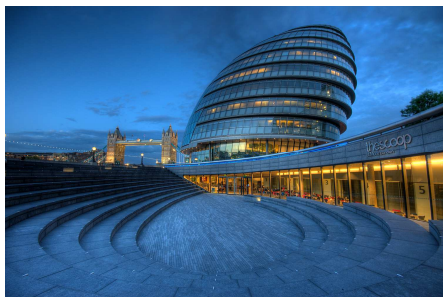


Local	Southwark, Londres, Reino Unido
Autores	Foster+Partners (Arquitetura), ARUP (Engenharia Estrutural e Acústica), MACE (Construção), Warner Land Surveys (Gestão Topográfica)
Área Total	19,814 m <sup>2</sup>
Custo	48,8M €
Data de Conclusão	Julho de 2002
Tempo de Construção	24 meses
Ferramentas digitais utilizadas	Microstation, Odeon
Certificações	'D' Energy Performance Certificate, 2012

A análise seguinte assenta essencialmente na descrição de Hugh Whitehead (Kolarevic 2003). Enquanto responsável do grupo SMG (Specialist Modelling Group) da Foster+Partners, Whitehead participou ativamente neste projeto, podendo relatar de forma clara o modo como o desenho evoluiu a partir da consideração do desempenho perante o sol.

De acordo com Foster+Partners (2002a), o London City Hall fez parte do plano de desenvolvimento *More London*, que teve a intenção de dar uma nova vida à margem sul do rio Tamisa, com novos edifícios de escritórios, restauração, lojas e muito espaço público ajardinado, numa zona da cidade há décadas sem qualquer desenvolvimento. O edifício acolhe a Câmara de Londres, e para além de espaços destinados à presidência e assembleia londrina, integra também vários espaços abertos ao público, exaltando a abertura e transparência do processo democrático. O edifício tem cerca de

12.000 metros quadrados de área útil ao longo de 10 pisos, um dos quais abaixo do nível do solo, e tem capacidade para 500 funcionários e para os 25 membros eleitos da assembleia.



**Figura 3.27\_**

cima: Anfiteatro “*The Scoop*”.

baixo: Vista interior dos gabinetes.

direita: Escadaria em rampa helicoidal.

Em termos convencionais, o City Hall não possui frente ou traseira claramente assumida. A entrada pode fazer-se diretamente ao nível do solo ou através de um anfiteatro exterior, aberto para norte, que permite a ligação com o piso térreo inferior. Neste piso encontram-se um restaurante, uma livraria, espaços de armazenamento, cinco salas de reunião e outros espaços auxiliares, para além de uma ligação à estrada subterrânea que dá acesso a uma infraestrutura de serviços compartilhada por todos os edifícios do plano *More London*, desimpedindo as áreas pedonais da circulação automóvel. Uma rampa faz a ligação entre este e o piso térreo, de nível com o solo, constituído por um espaço de exposição elíptico. No segundo piso encontra-se o espaço principal do edifício, a câmara da assembleia, onde todos os membros se reúnem em debate. Este espaço foi concebido com os assentos e mesa dos membros dispostos de forma circular, sem palco ou “cabeça” definidos e é parcialmente circundado por um espaço de plateia com 250 assentos [Figura 3.28]. Desta câmara emerge o principal elemento escultural de destaque, um rampa helicoidal com 500m de comprimento que cobre toda a verticalidade do lado norte do edifício. Os restantes acessos verticais localizam-se num núcleo central de



**Figura 3.28\_**

A disposição circular da mesa da câmara da assembleia remete para a Reunião do Rei Arthur com os seus cavaleiros na Mesa Redonda. Ao não evidenciar uma “cabeça”, a forma redonda representava a igualdade de todos os elementos em seu redor. Pintura de Évrard d’Espinques, 1470.



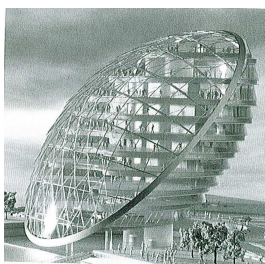
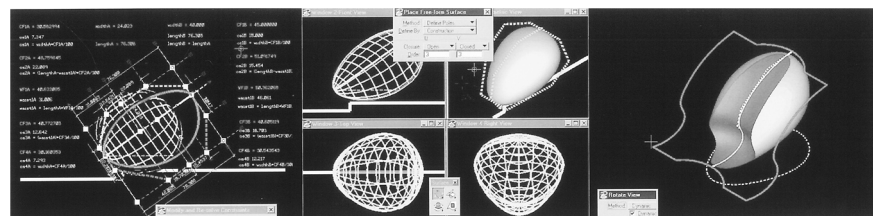
## Projetar com o Invisível

Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto

betão, juntamente com os sanitários e dutos de serviço. Do terceiro ao sétimo piso estão inseridos os escritórios administrativos, de divisão celular no lado sul e *open space* no lado norte com a possibilidade de serem compartimentados, enquanto que o oitavo é da exclusividade da presidência da câmara londrina. No último piso, conhecido como “*London’s Living Room*” e munido de serviços de cafeteria e lojas, encontra-se um espaço capaz de acomodar um grande variedade de eventos até 200 pessoas. Além disso, inclui ainda um terraço que oferece uma vista panorâmica sobre a cidade (Foster+Partners 2002b).

O plano da *More London* foi alvo de um concurso, no qual a proposta de Foster+Partners seria selecionada. Desde a fase inicial que o plano implicava a construção de um edifício exemplar em termos de eficiência energética e o desejo que a sua forma fosse o reflexo dessa preocupação. Por isso mesmo, a análise demonstrará a evolução do projeto desde a sua proposta inicial, já que todo esse processo de desenvolvimento viria a influenciar a forma final obtida.

**Figura 3.29\_**  
Modelo paramétrico da  
forma em “seixo”, realizada  
em ambiente de  
Microstation.



**Figura 3.30\_**  
Proposta em forma de  
“seixo” que foi a concurso  
em 1998.

Inicialmente o conceito passava por criar uma grande “lente” voltada para o rio, a norte, com um conjunto de lajes agarradas na parte de trás formando um perfil denteado. Deste conceito, algo intuitivo, a equipa percebeu que a solução passava por fazer algo relacionado com o rio, tendo o desenho prosseguido na tentativa de conceber um “seixo” [Figura 3.30]. Para isso a equipa procurou parametrizar essa forma, recorrendo-se do Microstation, *software* CAD da Bentley Systems e utilizado pelo escritório à época. Este processo tornar-se-ia essencial para a equipa de desenho, pois possibilitou a criação de um conjunto de modelos base de propriedades variáveis [Figura 3.29]. Como Hugh Whitehead afirma, “*embora possa levar várias horas ao nosso grupo para produzir um modelo paramétrico personalizado, ele será usado frequentemente durante vários meses pela*

*equipa na produção de alternativas a testar durante o desenvolvimento do projeto.” (Kolarevic 2003, 85).*

Graças à capacidade de processamento deste modelo, a equipa poderia desenvolver vários estudos de afinação até ao ponto de selecionar uma forma aceitável e otimizada para desenvolvimento posterior. A forma concebida com este processo apresentava já, nesta fase, propriedades de destaque. Segundo Whitehead, se o eixo principal estivesse alinhado com o sol do meio-dia, a forma apresentava uma área de superfície mínima em ganhos solares. Por outro lado, as elevações laterais também eram curvas, apresentando uma área mínima a leste e oeste, onde as fachadas enfrentariam um baixo ângulo de incidência solar. Do lado norte, a forma tinha um perfil quase circular e beneficiava da vista e frescura do rio Tamisa. No interior da grande lente surgia o átrio que comunicava com a câmara da assembleia e permitia a comunicação vertical entre pisos. Apesar da forma inicial deste átrio ter sido criada através da manipulação de curvas simples de modo a gerar uma superfície de corte ao volume inicial, apresentava qualidades estéticas e propriedades que serviriam de guias nas fases posteriores do projeto. O estudo da organização espacial interior revelou outra característica formal, os pisos tinham forma elíptica, com o eixo da elipse a encurtar, tornando-se de forma circular e, em seguida, alongando-se na direção oposta à medida que se aproximava do topo do edifício.

Seguiram-se uma série de estudos detalhados, com particular foco no revestimento da grande lente. Estes estudos basearam-se fortemente na conexão entre a tecnologias CAD e as máquinas CNC, já que cada um dos painéis de vidro em forma de losango teria dimensões únicas. De resto, as máquinas CNC e os processos CAM foram amplamente usadas na exploração de soluções para o revestimento, já que ao cortar as placas dos pisos e esticando faixas de fita sobre elas, os arquitetos poderiam facilmente materializar e testar as suas ideias. De acordo com Whitehead, *“alguns elementos foram ainda mais diretos nos seus métodos de trabalho - moldando um pedaço de plasticina e depois gravando a superfície com uma caneta.” (Kolarevic 2003, 86) [Figura 3.31].* Em suma, uma variedade

### Projetar com o Invisível

Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto

de meios digitais e analógicos foram usados e combinados durante a exploração de opções para a lente e seu revestimento.

**Figura 3.31\_**

Alguns modelos realizados durante o processo de procura formal.

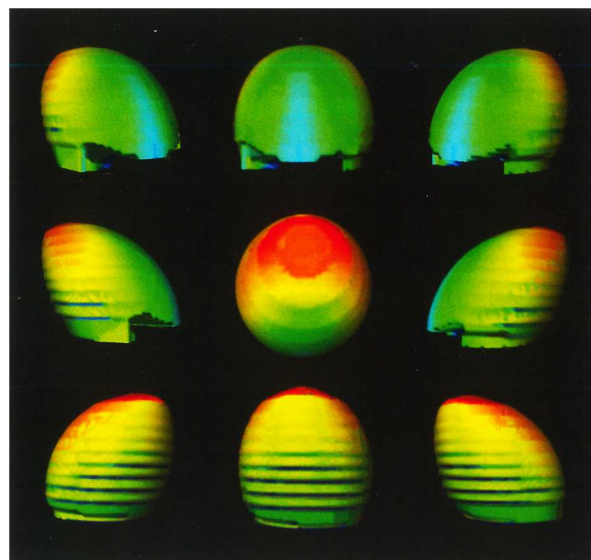


No entanto, seriam as análises de incidência solar que viriam a provocar novas alterações de desenho no projeto. Estes estudos tiveram a colaboração dos engenheiros da ARUP. Da sua análise em *software* específico, resultou uma imagem que, através de um código de cores, permitiu rapidamente analisar a superfície de acordo com a quantidade total de energia recebida durante um ano por cada painel de revestimento. Desta imagem, a equipa de Norman Foster pôde rapidamente perceber que a fachada sul se comportava como esperado, graças ao auto sombreamento provocado pelo desfasamento dos pisos. Também a este e oeste, a análise mostrava que a inclinação da fachada estava a limitar os ganhos solares no edifício. No entanto, no lado norte, onde o átrio se encontraria, existia apenas uma pequena porção central salvaguardada de ganhos solares.

**Figura 3.32\_**

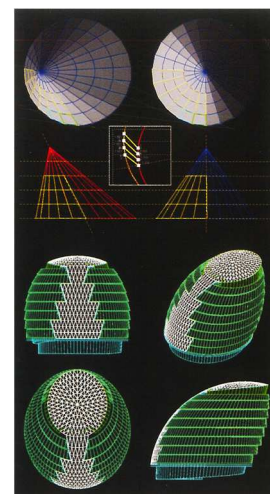
Análise da incidência solar para a proposta inicial, “em seixo”.

Do vermelho ao azul, estão identificadas as áreas com maior e menor incidência solar anual, respetivamente. Adicionalmente a estes estudos foi ainda fornecida uma tabela detalhada com os valores de radiação.

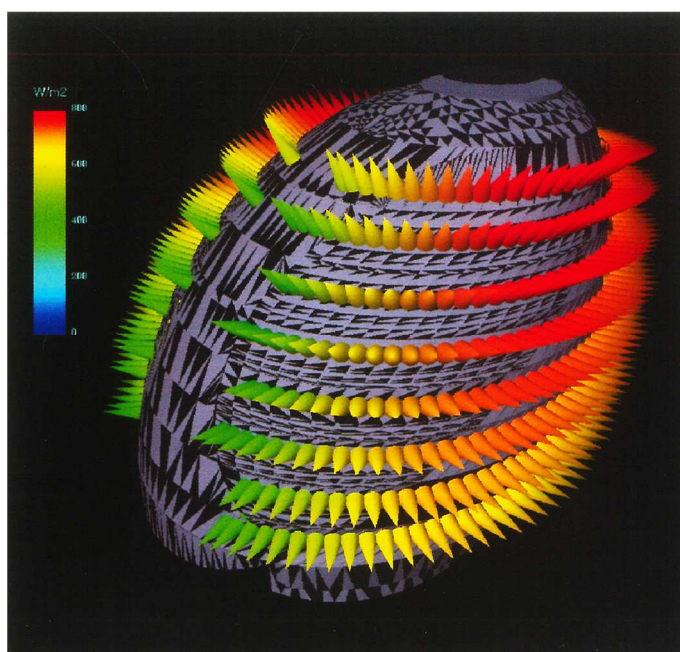


A lente era excessivamente grande para assegurar a proteção da radiação ambicionada para a zona do átrio e acabava por comprometer o desempenho energético de todo o edifício [Figura 3.32].

Por esta razão, tornou-se imperativo repensar o esquema proposto para o revestimento do edifício. Apoiado na leitura do diagrama colorido produzido pela ARUP, a solução final resultou numa alteração radical de modo a que o desenho do sistema de revestimento obedecesse aos problemas revelados na análise solar. A lente era eliminada e, com isso, o sistema de revestimento do átrio deixava de fazer sentido. Ainda assim, os painéis de revestimento dos escritórios tinham necessariamente de permanecerem planares. A solução geométrica para este problema, passou por racionalizar a superfície numa sucessão de cones cortados, permitindo que os painéis permanecessem planares independentemente da sua dimensão e geometria [Figura 3.33]. Estas otimizações foram desenvolvidas em Microstation, onde foi também produzida uma tabela com as dimensões de todos os 3.844 painéis de vidro, facilitando o cálculo dos custos e a comunicação com os fabricantes. Da optimização geométrica do edifício e dos painéis de revestimento resultaria uma forma dinâmica e fluída que mantinha o conceito da ideia inicial e maximizava a luz diária e a ventilação natural [Figura 3.34].



**Figura 3.33\_**  
Solução para o revestimento do City Hall, baseada no corte da forma geométrica do cone.



**Figura 3.34\_**  
Análise da incidência solar da proposta final.  
Do vermelho ao azul, estão identificadas as áreas com maior e menor incidência solar anual, respetivamente.



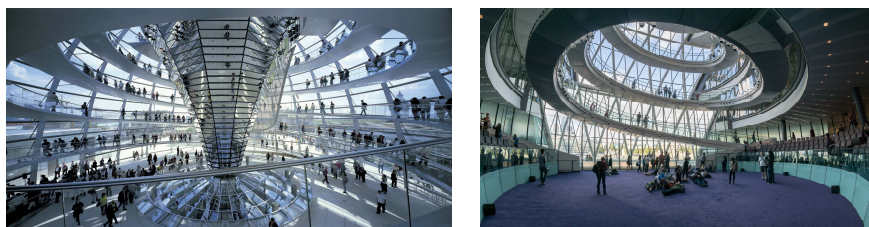
Com a sua forma de esfera deformada, o London City Hall tinha uma área de superfície 25% menor do que um cubo de volume idêntico, resultando numa minimização da área de superfície exposta à luz direta e, por conseguinte, na redução de ganhos e perdas de calor através do seu revestimento (Kolarevic 2005). Por outro lado, a forma aerodinâmica permitia uma circulação fluída do vento em seu redor, minimizando as cargas na estrutura e no revestimento e aumentando o conforto pedestre na zona envolvente.

Ainda assim, o desenho do City Hall não estava completamente fechado e viria a depender ainda da componente acústica – também invisível – tendo sido um dos primeiros projetos a fazer uso das ferramentas de análise digital durante a fase de conceção no que ao tratamento do som se refere (Schittich 2013). Este trabalho focou-se essencialmente no átrio em rampa, onde havia um forte desejo que este assumisse forma circular e fosse todo em vidro, ou seja, assemelhando-se a um frasco químico de vidro contendo a câmara da assembleia na sua base o que, a priori, representava um enorme desafio acústico.

Durante o processo de desenho, a equipa desenvolveria um modelo digital que permitia a exploração formal do átrio através de processos sequenciais. Deste modo, partindo de uma forma em balão simétrico, a forma circular do plano foi transformada numa elipse, o centro de gravidade foi movido para o fundo do balão e o topo foi gradualmente dobrado de modo a ajustar-se à curvatura da fachada norte (Kolarevic 2003). Nesta fase, a equipa de Foster pensou que o som emitido por uma pessoa na câmara da assembleia iria refletir nas paredes e escapar pelo topo do “frasco”, mas após a análise acústica da geometria, os engenheiros acústicos da ARUP constataram que a câmara *“era excessivamente reverberante e que, sem algumas medidas de absorção do som, a acústica seria terrível.”* (Kolarevic 2005, 49).

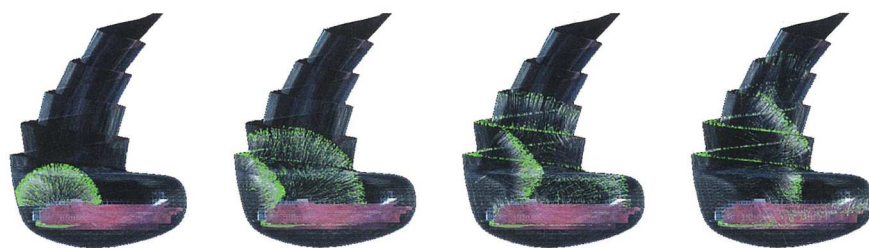
Era necessário incluir algo que pudesse quebrar o espaço, já que a inclusão de medidas de absorção romperia com o desejo de transparência desejado para aquele átrio. Com esta questão em mente, a inspiração viria de um projeto recentemente concluído pelo escritório de Foster, o Reichstag, que

apresentava uma rampa em espiral inserida numa cúpula envidraçada situada acima da câmara do parlamento [Figura 3.35].



**Figura 3.35\_**  
Semelhanças entre o Reichstag, novo edifício do parlamento alemão (1999) e o London City Hall.

No City Hall, este esquema seria ligeiramente alterado pois a rampa em espiral estaria exterior ao “frasco”. As análises acústicas demonstraram que nesta situação o som se comportava de maneira totalmente diferente, pois as ondas de propagação do som eram dispersas e refletidas pelas superfícies inclinadas do envidraçado em direção ao topo do átrio, evitando os ecos e reverberações da proposta inicial [Figura 3.36]. No entanto, outra dificuldade surgiria. Tornar planos os painéis de vidro do átrio, apresentava-se ainda mais difícil de resolver que o próprio revestimento exterior do edifício, não só devido à forma elíptica como ao facto das elipses reduzirem progressivamente em tamanho. Depois de encontrada e testada em modelo físico, a solução final passou por mover a rampa para o interior do “frasco” do átrio, de modo a que o envidraçado se pudesse separar e deslocar para fora, reproduzindo na íntegra o conceito aplicado no Reichstag. Desta feita, o envidraçado continuava a estar inclinado e a ter as mesmas propriedades acústicas enquanto que a rampa era trazida para o interior do átrio, enaltecendo a proximidade do público com o processo político.



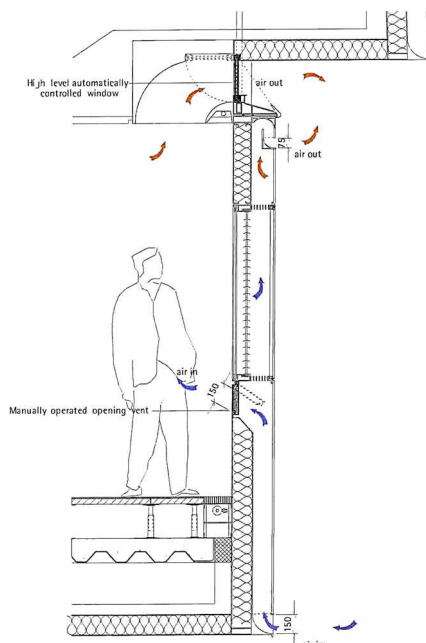
**Figura 3.36\_**  
Animação 3D da propagação do som no átrio do City Hall.

Projetado, desde o princípio, com a ambição de se impor como a referência ambiental na nova arquitetura londrina, o City Hall incorpora várias

características ativas e passivas de visam reforçam a sua sustentabilidade. Algumas delas foram sendo já referidas, como a inclinação do edifício e o impacto energético daí proveniente, mas também a própria implantação do edifício potencia a exploração de recursos naturais como o sol, o vento ou a água.

Apesar do sombreamento natural proporcionado pelo escalonamento dos pisos, principalmente no lado sul, os painéis de vidro triplo estariam ainda bastante suscetíveis à incidência solar direta. Tanto do exterior como do interior, o edifício parece totalmente revestido a vidro, no entanto, 75% da sua superfície é opaca, o que em muito se deve aos sistemas de controlo solar incorporados nos painéis envidraçados da fachada. Como se pode ver na Figura 3.37, a parte inferior de cada painel é constituída por uma peça de vidro opaco de insulação que impede a entrada de radiação solar e encobre uma entrada de ar fresco. Ao nível do olhar, o sombreamento é feito através de estores reguláveis manualmente, enquanto que na parte superior, volta a repetir-se o sistema da parte inferior do painel. Acima deste painel e já quase impercetível existe uma pequena janela que é controlada automaticamente e permite a renovação do ar.

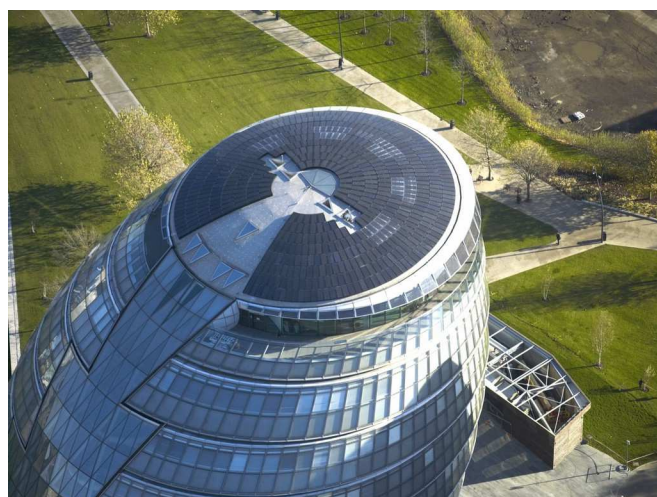
Para a refrigeração, o edifício serve-se de água subterrânea bombeada a partir de dois furos que furam 125m até ao nível do lençol freático (Foster+Partners 2002a). Esta água é previamente aquecida ou arrefecida ainda no subsolo, passando de seguida pelo interior das vigas estruturais de todo o edifício, aquecendo-o. No átrio, de modo a evitar a presença de dutos inestéticos, a água circula pelas vigas horizontais da grelha estrutural da fachada, que têm um diâmetro de 300mm. Uma das vantagens deste sistema é a possibilidade de controlar a quantidade de água a ser bombeada que, ainda assim, depois de usada na refrigeração do edifício é reutilizada nas descargas dos sanitários. Não obstante, sempre que possível são privilegiados os sistemas de ventilação manuais existentes na fachada e, por isso, sempre que esses mesmos sistemas estão abertos, a refrigeração local é automaticamente suspensa, evitando-se desperdícios de energia. Também o calor interno gerado pelos computadores, luzes e pessoas é recolhido no núcleo central do edifício e redirecionado para as zonas periféricas, principalmente no inverno.



**Figura 3.37\_**

Pormenor construtivo do sistema de revestimento enviaçado pelo lado sul. Cada painel cobre toda a altura do piso, tem uma largura de 1,5m e é constituído por vidro de baixa emissividade.

A combinação de todos estes fatores evitou a existência dos ruidosos e inestéticos aparelhos de ar condicionado na cobertura, e mais importante ainda, permitiu uma redução de 50% do consumo de energia do City Hall quando comparado com um edifício típico do género (Foster+Partners 2002a) [Figura 3.38].



**Figura 3.38\_**

Instalação de painéis solares na cobertura, em 2007. Os painéis solares foram dispostos segundo o estudo solar efetuado pela ARUP ainda na fase de conceção.

Como em qualquer projeto, a construção seguiu uma ordem de acontecimentos específica, tendo-se, neste caso, concretizado do centro para as extremidades, isto é, iniciando pelo núcleo de betão e terminando no revestimento [Figura 3.39]. Assim, antes de iniciada a fabricação e

### Projetar com o Invisível

#### Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto

construção, todo o modelo digital foi racionalizado, tendo sido identificados os seguintes componentes: o núcleo central de betão, a estrutura de aço, a rampa, o átrio, o envidraçado da entrada, a grelha estrutural da fachada norte e o sistema de revestimento do lado dos escritórios.

**Figura 3.39\_**

Fase de construção. No total, a estrutura de aço do edifício pesa cerca de 4.000 toneladas.



Devido à complexidade formal do projeto e, uma vez que cada componente tinha o seu próprio fabricante, o processo passou também por clarificar a geometria do edifício de modo a facilitar a sua comunicação. Segundo Whitehead, este processo seria apelidado de “Nove Passos para o Céu”, uma vez que a forma final poderia ser descrita como uma sequência de nove processos, dependentes entre si, usando apenas curvas baseadas na geometria do arco. Apesar de parecer contraditória a ideia de simplificar uma geometria complexa, inicialmente pensada como uma superfície de geometria livre, a grande vantagem deste processo prendia-se com a facilidade de transferência da informação projetual entre os vários fabricantes que, ao seguirem esta definição poderiam gerar a geometria do edifício a partir de termos básicos de trigonometria estabelecidos pela equipa de Foster. Além disso era ainda evidente a dificuldade dos *softwares* daquela época em processar geometrias muito complexas. Assim, cada fabricante produziu o seu próprio modelo digital, evitando-se alguns dos problemas que ocorrem, normalmente, na transferência de informação entre diferentes programas CAD. É importante referir que depois de finalizados, estes modelos foram sujeitos a um processo de

verificação, garantindo que todas as coordenadas do projeto se mantinham e que não existiam quaisquer discrepâncias em relação ao modelo de referência. Por outro lado, este processo atribuía a responsabilidade dessa fabricação exclusivamente ao fabricante, libertando a equipa de desenho da necessidade de dominar outros *softwares* CAM específicos.

A materialização da forma do City Hall traria uma das maiores dificuldades em todo o projeto. Dado que o edifício se “inclinava” para trás, as cargas sobre a estrutura aumentariam com o número de pisos provocando uma deflexão progressiva da estrutura aquando da construção. Segundo Whitehead, no topo do edifício havia uma oscilação de 50mm, à qual foi acrescentada uma tolerância de 50mm e uma folga mínima com a mesma dimensão, exigindo um total de 150mm entre o limite da laje e o revestimento. Assim, era necessário um sistema que pudesse acomodar este tipo de variações na instalação dos painéis de revestimento (Kolarevic 2003).

Como a previsão deste comportamento não garantia total fiabilidade, a solução passou por medir e monitorizar as deflexões durante a própria construção. Esta tarefa ficaria a cargo da empresa Warner Land Surveys, inicialmente responsável pelo levantamento topográfico do local e, posteriormente, contratada pelo fabricante da estrutura em aço para controlar a sua fabricação e monitorizar a montagem dos sistemas de revestimento no local, acabando no final por controlar todos os aspetos dos processos de fabricação e construção do City Hall. Um pouco à semelhança dos restantes fabricantes, também esta empresa produziu o seu próprio modelo digital do projeto que, dada a precisão e abrangência da sua tarefa, se repartiu em três modelos diferentes. Um modelo digital funcionando como base de comparação, um modelo de fabricação para gerir as distintas tolerâncias dos materiais, e um modelo de construção que permitia a monitorização das deflexões em obra. Assim, tanto a fase de fabricação como a de construção poderiam ser avaliadas com o seu respetivo modelo, tendo em conta as suas condições específicas.

Para controlar o posicionamento dos elementos durante a construção, a equipa da Warner Land Surveys marcou cada viga de aço com alvos

### Projetar com o Invisível

#### Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto

holográficos ainda em ambiente fabril. Ao mesmo tempo que o fazia, as coordenadas de cada alvo eram registadas numa base de dados, possibilitando a identificação e localização de cada peça desde a fábrica até à montagem final (Kolarevic 2003). Já em obra, com a leitura dos alvos, através de equipamento de levantamento a laser, foi possível medir as coordenadas xyz de cada elemento e comparar a sua posição relativa com o modelo de referência para a construção. Uma vez que esta leitura tinha uma precisão milimétrica era possível ajustar com extrema precisão a correta posição de cada elemento estrutural, contrariando as perigosas e indesejadas deflexões estruturais à medida que a estrutura ia sendo montada [Figura 3.40].

**Figura 3.40\_**

esquerda: Leitura de coordenadas na montagem da estrutura de aço.  
direita: Montagem de um painel de vidro.



Os painéis de vidro que revestem o edifício passaram por um processo de identificação idêntico. Todos os 3.844 painéis de vidro são diferentes e foram cortados por máquinas de laser apartir dos modelos de fabricação previamente produzidos. Para otimizar a identificação de cada um dos elementos foi atribuído, a cada um deles, um código de barras de acordo com as suas dimensões e com precisão tal que até mesmo peças com variações inferiores a um décimo de milímetro foram rotuladas com códigos distintos. Ainda em fábrica, os painéis foram também verificados e submetidos a vários testes. Num deles, foi testada a montagem do revestimento, onde três painéis adjacentes foram colocados lado a lado numa plataforma hidráulica ajustável, permitindo simular todas as configurações posicionais entre as lajes e os painéis ao longo do edifício. Adicionalmente, os painéis foram submetidos a testes de vento gerado por

um motor de avião, assim como a testes de impacto, em que foram balançados grandes pesos contra os painéis de vidro, atestando a sua resistência (Kolarevic 2003). Na construção, os painéis foram montados individualmente, usando conexões feitas à medida, projetadas para se adaptar à grande variedade de movimentos e possíveis deflexões que a geometria do edifício carece, proporcionando um ajuste perfeito de todo o sistema. De igual modo, também a grelha estrutural da fachada do átrio passou por um processo de pré-fabricação, recorrendo-se às tecnologias de fabricação digital por forma a garantir um maior rigor aquando da sua montagem em obra. Todos os trabalhos de otimização e racionalização da informação, atrás referidos, possibilitaram que os prazos e orçamentos definidos fossem cumpridos.

Concluindo, o London City Hall demonstra o modo como a consideração pela componente “invisível” do sol determinou o desenvolvimento posterior do projeto. Vimos que o projeto se serviu, numa primeira fase, do desenho e da materialização das ideias pensadas para, com a interferência das tecnologias digitais, evoluir num sentido de dependência do desempenho. Da proximidade entre a equipa de arquitetura e os restantes especialistas, resultou um maior domínio e capacidade de resposta face aos problemas que surgiram durante o projeto. No final, resultou uma forma distinta que procurou dar uma resposta melhorada às especificidades do local e, acima de tudo, às exigências de desempenho do “invisível” a que se propôs desde a fase inicial do projeto.

*“In London's new city hall, Lord Foster and his colleagues at Foster+Partners have turned technological bravura to a more explicitly social agenda: energy conservation.”*

(New York Times 2003)





### 3.2.3 \_ O Som

*"O som do espaço é um dos problemas de engenharia mais complexos com que o arquiteto se tem deparado. As pessoas têm construído estruturas para o desempenho há milénios, mas foi apenas no último século que começámos a entender por que alguns espaços físicos soam melhor que outros."*

Yasuhisa Toyota, Engenheiro Acústico (Uncube 2014)

Tratando-se a audição de um dos sentidos mais rapidamente pressentidos pelo homem, o som desempenha um papel vital no modo como percebemos e apreciamos o ambiente que nos rodeia. Uma boa acústica é essencial para o bom funcionamento de qualquer edifício e não apenas no desempenho acústico de uma sala de concertos, como muitas vezes se pode pensar. Boas condições acústicas beneficiam também a saúde mental do ser humano, por isso, aquilo que ouvimos e o modo como ouvimos acaba por ter um impacto fundamental em todos os aspetos da nossa vida.

Atualmente existem várias ferramentas digitais que auxiliam arquitetos e engenheiros acústicos no processo de desenho, no entanto, nem sempre fora assim. No passado, os arquitetos faziam uso de técnicas analógicas e recorriam a modelos físicos como forma de testar, visual e acusticamente, o comportamento do som [Figura 3.41 e Figura 3.42]. *"Por exemplo, revestindo o interior dos modelos com material refletivo e, em seguida, incidindo lasers a partir de várias posições, eles tentavam avaliar as linhas de visão e de trajetória do som para o público numa sala. Tentavam também medir as qualidades acústicas de um ambiente proposto realizando testes acústicos num modelo usando fontes e recetores, escalonados em frequência e tamanho. Até mesmo modelos de água eram usados para visualizar a propagação das ondas acústicas num projeto."* (Monks 1999, 15). No entanto, estes métodos tradicionais mostravam-se morosos e particularmente inflexíveis quanto à reformulação própria da evolução de um projeto.

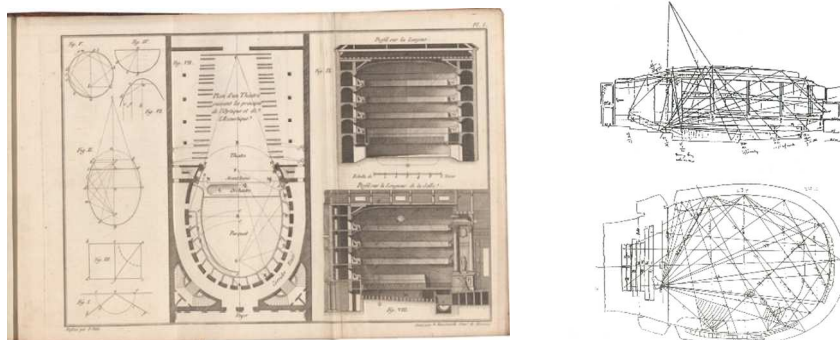
## Projetar com o Invisível

### Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto

**Figura 3.41 \_**

esquerda: Diagrama de raios acústicos no desenho de um teatro. Pierre Patte, 1782.

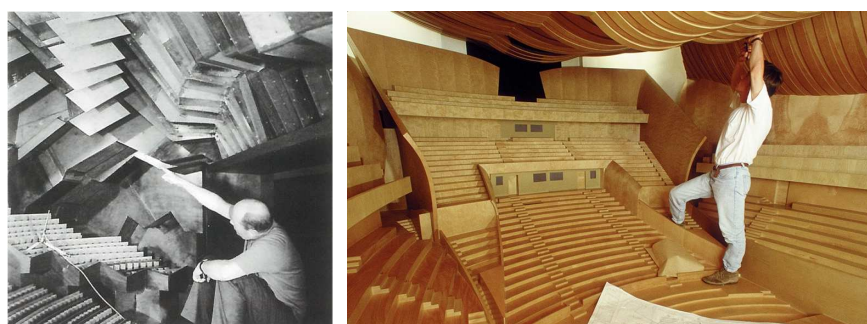
direita: *Ray Tracing* manual no estudo da Salle Henry-le-Boeuf, Bruxelas. Victor Horta, 1929.



**Figura 3.42 \_**

esquerda: O engenheiro acústico Vilhelm Jordan dentro do modelo físico da Sidney Opera House, de Jørn Utzon.

direita: Engenheiro acústico Yasuhisa Toyota dentro do modelo físico 1/10 do Walt Disney Concert Hall, de Frank Gehry.



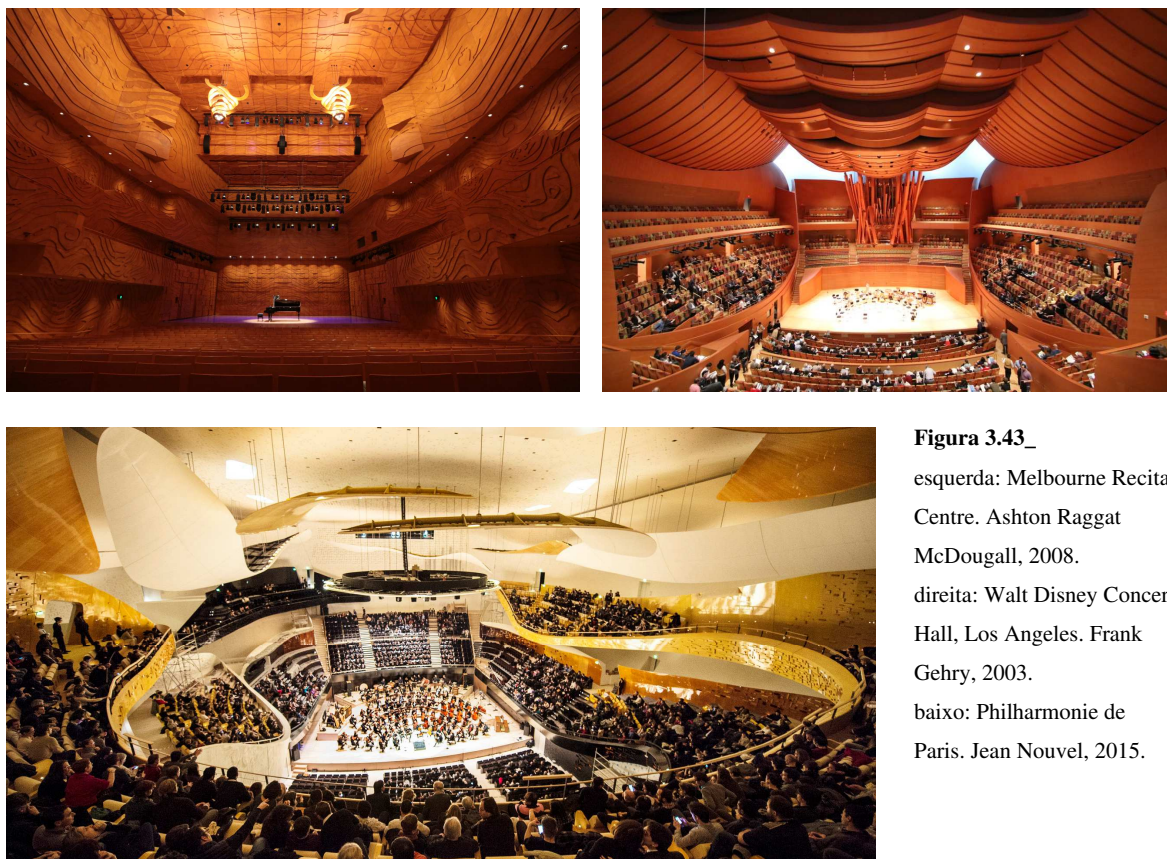
Esta variedade de abordagens dá lugar, com o surgimento do computador e dos programas de visualização 3D, a técnicas de análise digital mais rápidas e intuitivas. Os primeiros programas de modelação acústica computadorizada surgiram na década de 1980, altura em que arquitetos e engenheiros tomaram o primeiro contacto com esta tecnologia. Segundo Raj Patel, engenheiro acústico na ARUP, “*em meados de 1990 os programas de modelação acústica computadorizada estavam bem desenvolvidos, e o poder de computação era adequado para que eles estivessem em uso disseminado em vários projetos.*” (Schittich 2013, 116).

Das dimensões performativas abordadas neste capítulo, a acústica é, talvez, a mais específica no que às suas características diz respeito. A preocupação com o som tem figurado desde sempre, tanto na disposição dos anfiteatros romanos como na organização espacial das igrejas. Ainda assim, até aos dias de hoje, esta componente tem sido maioritariamente considerada em edifícios com programas funcionais muito técnicos e cujo próprio funcionamento depende diretamente do desempenho performativo da acústica, como é o caso das salas de concertos, teatros ou auditórios.

Atualmente, ferramentas como o Odeon, o COMSOL ou os *plug-ins* Pachyderm e Esquissons para o Grasshopper (Rhinoceros), dão ao arquiteto a possibilidade de antever o comportamento do som em projetos de variadas escalas e programas funcionais.

Além do já referido London City Hall, esta consciência pelas questões acústicas na arquitetura pode ser encontrada em obras como, a Sidney Opera House (1973), o Walt Disney Concert Hall (2003), o Melbourne Recital Centre (2008) ou a mais recente Philharmonie de Paris (2015) [Figura 3.43].

Para esta análise particular, aprofundaremos a importância da acústica na Elbphilharmonie, em Hamburgo, por retratar de forma convincente o modo como o tema do som pode influenciar a forma e a eficiência final do projeto quando dominada desde a fase inicial do processo projetual.



**Figura 3.43\_**

esquerda: Melbourne Recital Centre. Ashton Raggat McDougall, 2008.

direita: Walt Disney Concert Hall, Los Angeles. Frank Gehry, 2003.

baixo: Philharmonie de Paris. Jean Nouvel, 2015.



## Projetar com o Invisível

Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto

### Elbphilharmonie, Herzog & de Meuron



Local	Hamburgo, Alemanha
Autores	Herzog & de Meuron, Höhler+Partner (Arquitetura), Nagata Acoustics Inc., One to One (Engenharia Acústica), Peuckert (Fabricação e Montagem dos Painéis Acústicos), Schnetzer Puskas Ingenieure AG (Engenharia Estrutural)
Área Total	120.000 m <sup>2</sup>
Custo	865M €
Data de Conclusão	Janeiro de 2017
Tempo de Construção	120 meses
Ferramentas digitais utilizadas	Rhinoceros, VectorWorks Spotlight, EASE
Certificações	--

**Figura 3.44\_**

Datado de 1875, o Kaiserspeicher era o maior armazém de Hamburgo. Possuía uma torre sineira neogótica que dava as boas vindas às embarcações mas seria destruído na II Guerra Mundial (direita). Em 1966, surgia no mesmo local o Kaispeicher A, por Werner Kallmorgen (esquerda). Nele seriam armazenados cacau, tabaco e chá, até à década de 90. As pequenas janelas com 0,5x0,75m de dimensão seriam mantidas na Elbphilharmonie.

Erguendo-se das ruínas dos antigos armazéns navais da cidade, a Elbphilharmonie é a mais recente sala de concertos de Hamburgo, localizada na margem do rio Elba, a quem deve o seu nome. A forma do novo edifício resulta da extrusão do volume preexistente do Kaispeicher A [Figura 3.44], perfeitamente congruente com o bloco de tijolo do edifício em cima do qual foi construído.



Em contraste com a linguagem maciça e silenciosa do Kaispeicher A, o novo edifício destaca-se pelo dinamismo das formas onduladas do telhado e pela transparência da fachada, numa imagem formal que remete para a proa de um navio ou para uma onda cristalizada. A sua fachada, completamente envidraçada, é constituída por painéis de vidro curvo pontualmente abertos, transformando-o num cristal gigante que absorve todas as reflexões do céu, da água e da cidade. A sua cobertura ondulada eleva-se a uma altura total de 110m na frente para o rio Elba e inclina-se para a cidade onde é cerca de 20m mais baixa [Figura 3.45].

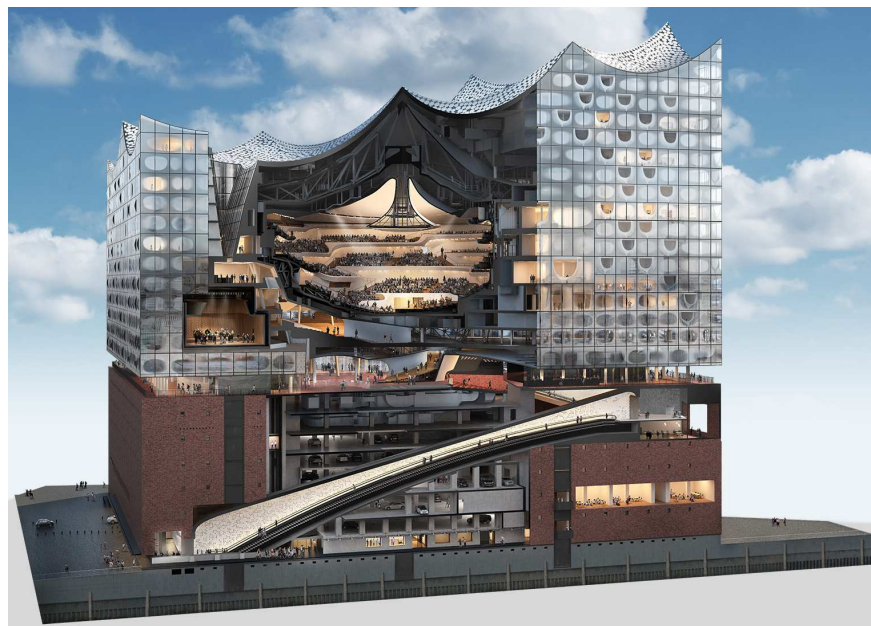


**Figura 3.45\_**  
Vista aérea da  
Elbphilharmonie, implantada  
na zona portuária da cidade.  
Com 26 pisos e 110m de  
altura, é o edifício habitado  
mais alto em Hamburgo.

Desde o início que Herzog & de Meuron pretenderam manter a herança do passado do sítio. Como refere Jacques Herzog, a equipa queria “*manter a integridade do armazém, com a sua base pesada e rochosa, para o estacionamento e outros usos.*” (Stephens 2016). Por esse facto, dois terços do antigo armazém, cujas fachadas foram mantidas, é ocupado pelo estacionamento com capacidade para 500 automóveis e que abrange 7 pisos que comunicam verticalmente através de uma rampa em espiral. Também inserido neste volume está a Kaistudio, uma das 3 salas de concerto existentes no edifício, com capacidade para 170 pessoas, dedicada à música contemporânea e experimental e para ensaios coral e de orquestra.

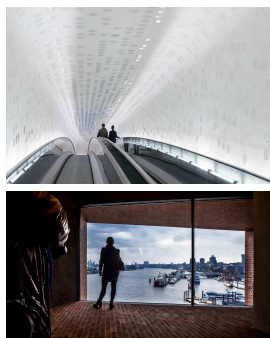
## Projetar com o Invisível

Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto



**Figura 3.46\_**

Modelo 3D seccionado da Elbphilharmonie.



**Figura 3.47\_**

Escada rolante curva com 82m de comprimento que desemboca numa janela panorâmica sobre o rio.

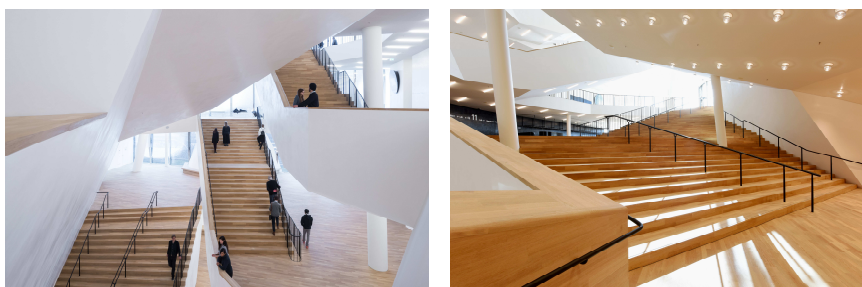
De acordo com Sealy (2013), a entrada principal no edifício faz-se pelo lado este, onde uma escada rolante guia os visitantes por um túnel até uma grande janela panorâmica voltada para o rio. Esta escada rolante é ligeiramente curva, o que impossibilita o vislumbre da sua extremidade, acabando por resolver um problema de otimização espacial no estacionamento e recriando uma experiência cénica idêntica às longas escadarias das antigas salas de concerto da Europa [Figura 3.47]. Uma segunda escada rolante, de menor dimensão, faz a ligação entre este espaço intermédio e uma praça pública localizada no topo do volume de tijolo.

A criação desta grande praça respeita o modo como o antigo volume existente comunicava com o solo, ao mesmo tempo que faz a ligação entre o antigo e o novo volume, entre espaço público e privado. Localizada a 37m de altura e com um total de 4.400 metros quadrados, esta praça contém um anel exterior que oferece uma vista panorâmica sobre a cidade e uma área interior protegida por paredes de vidro ondulado onde se encontram um café, uma loja, a receção do hotel e os *foyers* de acesso às várias salas. Acima desta praça e do lado este, o edifício conta com um hotel, dotado de 250 suítes, restaurante, bar, spa e sala de conferências e com 45 apartamentos de luxo do lado oposto, na parte mais alta do edifício voltada para o rio. Para além disso o edifício dispõe ainda de salas de conferências, restaurantes e cafés espalhados um pouco por todo o edifício.



A descrição programática do projeto fica completa com as restantes duas salas de concertos, a Recital Hall e a Grand Hall. A primeira resume-se a um espaço convencional de forma retangular revestido com painéis de madeira acusticamente ajustados e equipado com elementos tecnológicos que permitem a sua adaptabilidade a várias configurações, tendo capacidade para 550 pessoas. Já a Grand Hall, o principal espaço do edifício e bem localizada no coração do edifício, é uma sala com capacidade para receber 2.100 convidados e resultou do estudo intensivo da acústica, sobre a qual vai incidir o nosso estudo.

No interior da praça, largas escadarias serpenteiam entre as paredes brancas curvilíneas, levando os visitantes através de um *foyer* esculpido entre a Grand Hall, a Recital Hall e os restantes espaços [Figura 3.48]. Jacques Herzog admite que a sua conceção se baseou “*num processo arcaico de esculpir e esculpir*”, descrevendo o modo como grandes modelos físicos de cartão com 5m de largura foram manipulados. Remata afirmando que “*mais do que qualquer outro edifício que fizeram, precisaram de usar métodos diferentes para projetar aqueles espaços. Eles não podiam ser feitos no computador.*” (Wainwright 2016).



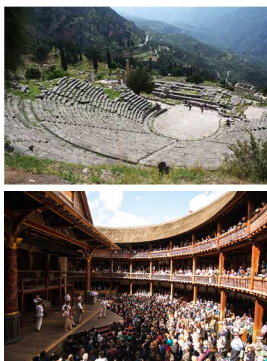
**Figura 3.48\_**  
Foyers de acesso às salas de concerto.

No que diz respeito à grande sala de concertos, Herzog & de Meuron referem que “*a Elbphilharmonie se inspira em três estruturas: no antigo teatro em Delphi, nos estádios desportivos e nas tendas.*” (Elbphilharmonie s.d.), o que explica, de certa forma, as ideias formais nela presentes. A Grand Hall assemelha-se à tipologia de estádio desportivo, pela evidente proximidade, quase interativa, entre público e músicos, uma vez que qualquer espectador está a menos de 30m de distância para o maestro (Stevens 2016). Do estudo de teatros antigos,



## Projetar com o Invisível

Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto



**Figura 3.49\_**

cima: Teatro de Delphi,

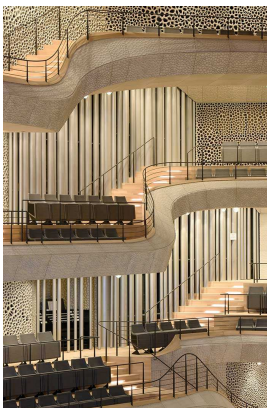
Grécia. Séc. IV a.C.

baixo: Shakespeare's Globe,

Londres. Pentagram, 1599.

como o de Delphi ou o Shakespeare's Globe, adveio a exploração da verticalidade e a sua repercussão no desempenho do som [Figura 3.49]. Por último, a referência à tenda é visível no teto da sala que, mais do que um aspeto estético, desempenha uma função performativa.

Da confluência destes fatores resultou a colocação da orquestra e maestro no centro da sala, com o público organizado por níveis de plateia intercalados em todo o redor o que, além de permitir uma vista desobstruída para o espetáculo, cria maior envolvência entre o espetador e a performance artística [Figura 3.50]. Esta proximidade entre público e artistas é também favorecida pela homogeneidade entre as paredes e o teto, que funcionam como uma só entidade fluída que abrange todas as superfícies da sala e a fazem parecer constituída unicamente de pessoas.



**Figura 3.50\_**

Na Grand Hall, o palco está a 30m do teto e a largura de um lado ao outro da sala é de apenas 40m.

A sala conta ainda com um órgão de quatro manuais e 65 tubos, perfeitamente integrado no desenho da sala.



Segundo Monks (1999, 14), “o desenho acústico é um processo difícil porque a percepção humana do som depende de fatores como o nível de decibéis, a direção de propagação e a atenuação ao longo do tempo, nenhuma delas tangível ou visível. Isto torna a performance acústica de uma sala muito difícil de antecipar.”. Neste seguimento, na Grand Hall, a disposição das cadeiras da plateia, a altura do teto ou a colocação das paredes dos corredores determinaria o modo como o som seria refletido para as várias partes da sala, sendo necessário assegurar que o seu desenho não comprometeria a percepção final do som. Face a esta exigência

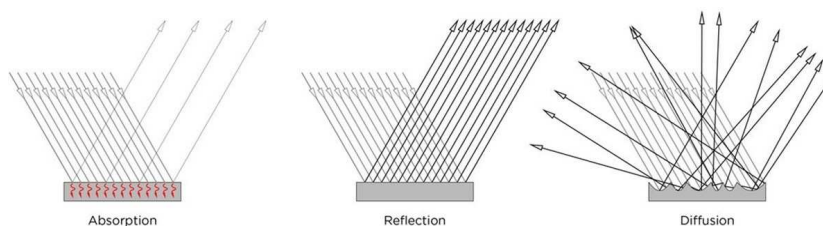
“invisível”, a equipa de Herzog & de Meuron colaborou com o engenheiro acústico Yasuhisa Toyota, da Nagata Acoustics Inc., de modo a atingir um balanço melhorado entre a performance do som e a estética do desenho, otimizando-o.

Quando Yasuhisa Toyota integrou o processo de projeto, já a equipa de arquitetura tinha definido a forma em “vinha” para a sala, conceito baseado na Berlin Philharmonie [Figura 3.51]. No processo de otimização do som, Toyota começou por usar a simulação computadorizada baseada na acústica geométrica de modo a estudar a distribuição das reflexões do som ao longo da sala. Com estes estudos digitais, a forma básica da sala foi amplamente debatida com a equipa de arquitetura.

Na fase seguinte, e após a fixação da forma final do espaço, Toyota recorreu a um modelo físico do interior da sala à escala 1/10, em que usou pequenos bonecos de feltro com microfones de grande sensibilidade integrados de maneira a poder avaliar o desempenho da acústica em lugares específicos da plateia [Figura 3.53]. A primeira fase do teste passou por verificar se existiam ecos prejudiciais e, caso se verificassem, perceber como poderiam ser eliminados. Em salas como a Grand Hall, que têm forma de “vinha”, o som pode sofrer fortes reflexões com longos atrasos temporais, provocando ecos prolongados (Georgi 2013). A análise constatou a presença desses mesmos ecos tanto no palco central como nos assentos mais próximos. Segundo Toyota (2007), a eliminação deste tipo de reflexões poderia ser feita de dois modos, alterando os ângulos das superfícies refletivas ou adicionando elementos de absorção ou difusão do som. A opção da equipa de arquitetura acabaria por recair pela última opção, adicionando painéis acústicos texturizados com concavidades que se assemelhariam a uma concha [Figura 3.52].



**Figura 3.51\_**  
Berlin Philharmonie, Berlim.  
Hans Scharoun, 1963.



**Figura 3.52\_**  
Difusão do som através da  
superfície texturada.

## Projetar com o Invisível

Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto



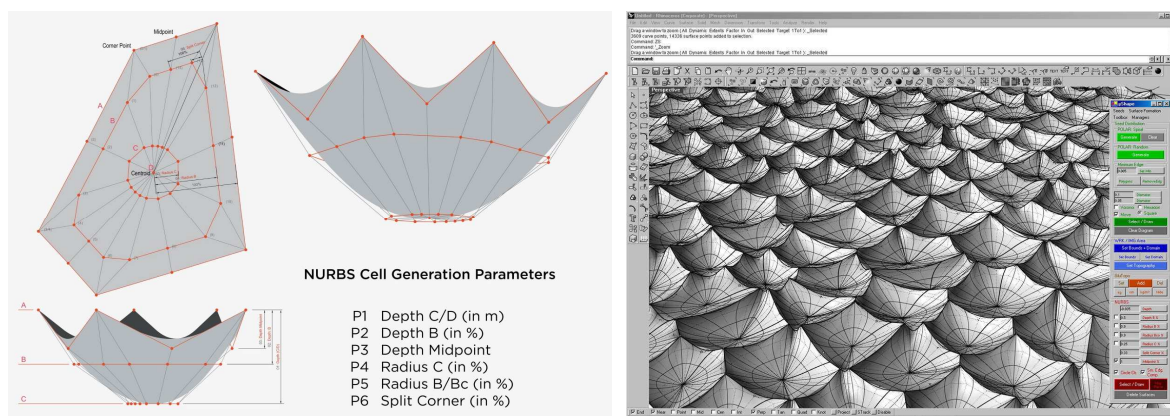
**Figura 3.53\_**

Modelo físico à escala 1/10 usado na avaliação da acústica da sala de concertos.

Posto isto, com base na geometria da sala e na análise acústica, Toyota constatou também que certos painéis, como os que revestem a parede do fundo da sala, precisariam de concavidades maiores e mais profundas de modo a absorver as reverberações. Enquanto que noutras áreas, como as superfícies do teto por detrás do refletor e as partes superiores das balaustradas exigiriam células mais rasas. Por outro lado, os arquitetos tinham as suas próprias preferências, já que esta “pele” tinha de ser consistente em toda a sala, ser bonita e também ser agradável ao toque em zonas de contacto direto com a audiência.

Transformando todas estas exigências em premissas, o estudo da texturização dos painéis ficou a cargo da empresa One to One que, através da geração de um algoritmo específico, pôde obter as características topológicas para cada painel segundo os padrões acústicos mapeados por Yasuhisa Toyota. Neste processo foram geradas cerca de um milhão de células, concavidades, dispersas por toda a superfície da sala. Estas células, com forma de concha, alteravam em tamanho e profundidade consoante as exigências acústicas do lugar em que estão inseridas, formando no conjunto uma superfície capaz de absorver ou dispersar as ondas sonoras em várias direções minimizando as reverberações constatadas por Toyota no modelo físico [Figura 3.54].





Ainda numa fase inicial, para testar a eficácia deste tipo de reentrâncias, foi produzida uma versão desta superfície à escala 1/10 e fixada às paredes do modelo de Toyota. O modelo físico serviu também para confirmar a aptidão acústica deste tipo de superfície e para afinar a profundidade das depressões de maneira a alcançar os resultados desejados.

Por outro lado, o modelo digital 3D facilitou o processo de subdivisão da superfície donde resultaram cerca de 10.000 painéis acústicos, com espessuras que variam entre 35 e 200mm e que pesam entre 35 e 125kg. Nos locais onde eram esperadas reflexões sonoras suaves, a profundidade das reentrâncias era de 10 a 30mm, enquanto que onde era necessário eliminar os ecos, a profundidade aumentava para valores entre os 50 e 90mm. Além disso, sendo necessário os painéis terem massa suficiente para refletir efetivamente o som, mesmo em baixas frequências, os painéis foram calculados de modo a terem uma densidade média pós-fresagem de 125 kg/m<sup>2</sup>.

Deste modo, antes de se iniciar a produção dos painéis seriam realizados alguns estudos sobre o material a usar na sua fabricação. Segundo Mergenthaler, colaborador de Herzog & de Meuron, a equipa não queria “a estética habitual de sala ‘aveludada’, ou o clichê dos instrumentos de madeira” (Wainwright 2016). Juntamente com os engenheiros da acústica, do fogo e da fabricação e montagem dos painéis, a equipa decidiu avançar para um composto de gesso natural e papel reciclado, vulgarmente conhecido por fibra de gesso, pois era o material que melhor se adaptava aos seus requisitos.

**Figura 3.54\_**  
Parâmetros aplicados na geração digital das células que variam entre 4 e 16cm de diâmetro.

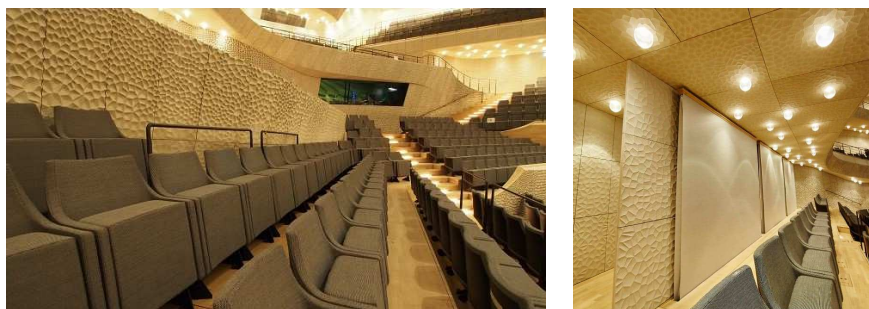
## Projetar com o Invisível

### Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto

Outro aspecto não menos importante prendia-se com as cadeiras da plateia que também interferiam no comportamento acústico da sala. Os estudos desenvolvidos ditaram o estofamento da região frontal do encosto e assento, e a aplicação de painéis de madeira na parte traseira do encosto. Pelo desenho e composição das almofadas, quando os assentos estão em posição levantada, forma-se um plano suave entre as cadeiras, o que melhora a estética e favorece a acústica [Figura 3.55]. Os testes efetuados por Yasuhisa Toyota constataram que a diferença de reverberação entre uma cadeira desocupada e ocupada é bastante pequena, devido à área de absorção constante em ambas as posições.

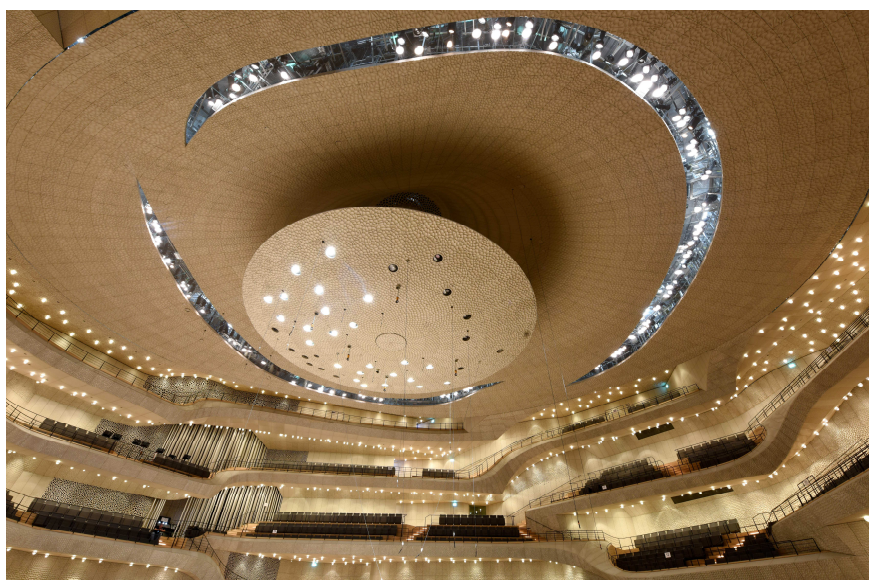
**Figura 3.55\_**

As exigências sonoras ditaram o desenho e materialização das cadeiras da plateia (esquerda), tal como a inclusão de painéis de têxtil altamente absorvente de controlo remoto (direita).



**Figura 3.56\_**

Refletor de 50 toneladas suspenso a 15m do palco central.



A acústica da Grand Hall, conta ainda com outro elemento ativo na performance da sala, um refletor sonoro, suspenso no centro do teto abobadado [Figura 3.56]. Este enorme refletor, além de absorver as ondas acústicas, ajuda a dispersá-las até ao topo do teto. Além disso, contém parte

dos sistemas de iluminação e som assim como outros equipamentos técnicos. A sala está ainda equipada com 81 painéis de absorção, que se elevam do pavimento e permitem um maior controlo da reverberação do som, adaptando-se consoante as exigências sonoras.

Na Grand Hall, os painéis acústicos acabam por revestir todas as superfícies da sala, sejam paredes, tetos ou balaustradas à exceção do pavimento. Ainda assim, apesar de ser forrado a madeira, este encobre placas planas de fibra de gesso assentes por baixo de si e que melhoram a absorção do impacto sonoro da música e da circulação do público.

Todos estes fatores fazem com que a Grand Hall disponha de uma acústica direta e definida em qualquer ponto, com um tempo de reverberação de 2,3 segundos, que se aproximam do valor de referência, de 2,2 segundos, considerada ideal para uma sala de concertos deste género [Figura 3.57].

Acoustic quantity	Grosser Saal	Kleiner Saal (Concert Config.)
Reverberation Time, T30, in seconds		
Unoccupied	2.4	1.7
Occupied	2.3	1.4
Sound strength, G, in decibels	5.4	11.0
Early decay time(EDT), in seconds	2.3	2.0
Clarity, C80, in decibels	0.3	-0.8
Centre time, TS, in milliseconds	135	143

Note) Frequency averaging 500 Hz to 1000 Hz, measured in unoccupied

**Figura 3.57\_**

Valores da acústica da  
Grand Hall e Recital Hall.

Como explica Jacques Herzog, “a disseminação do som numa sala de concertos é decisiva para a qualidade da acústica. (...) Para consegui-lo, a geometria da sala, os materiais usados e a estrutura da superfície devem estar perfeitamente afinados. É essa estrutura particular e a transição perfeita entre as paredes e o teto que fornecem à sala de concertos as suas características algo naturais.” (Stevens 2016).

Benjamin Koren, engenheiro acústico da empresa One to One, considera que seria impensável simular este desempenho através de processos unicamente analógicos, acreditando que o recurso às tecnologias digitais promoveu a otimização performativa da acústica e a geração de uma superfície única. De facto, apesar de modelos físicos terem sido usados em algumas fases, não só a conceção e validação acústica da sala como as restantes componentes do projeto basearam-se na modelagem digital. Por sua vez, isto deu a oportunidade às várias especialidades e fabricantes de

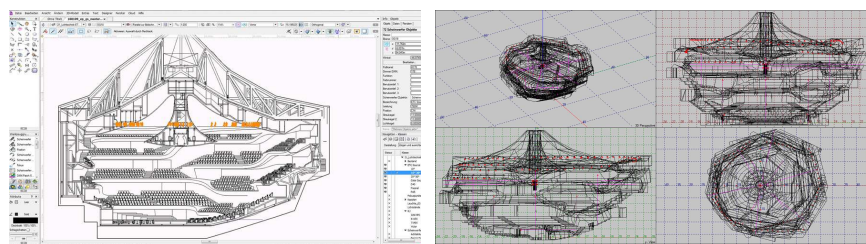
## Projetar com o Invisível

### Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto

racionalizar a informação mais conveniente para os seus estudos e de criar os seus próprios modelos [Figura 3.58]. Além disso, o modelo global permitiu a consulta a qualquer momento de informação adicional do projeto.

**Figura 3.58\_**

esquerda: Estudo de iluminação e das estruturas de içamento na Grand Hall, realizado no *software* VectorWorks Spotlight.  
direita: Estudo acústico para a determinação dos locais a receber os sistemas de som na sala de concertos, realizado no *software* EASE.



No que toca à fabricação dos 10.000 painéis acústicos da Grand Hall, pela sua quantidade e complexidade, o processo constituiu por si só um dos grandes desafios de todo o projeto. Assim, com o intuito de agilizar e otimizar a fresagem das mesmas, este processo fez uso da tecnologia CAM e ferramentas associadas. O processo de fresagem, a cargo da empresa Peuckert, fez uso de um braço robótico de cinco eixos e dividiu-se em duas fases. A primeira consistiu no corte dos limites externos de cada um dos painéis e da perfuração dos encaixes onde, posteriormente, uma estrutura seguraria mecanicamente os painéis na sua posição final. Na segunda fase, e depois de reposicionado o painel, procedeu-se à fresagem das concavidades, utilizando uma fresa de ponta esférica do tamanho de uma caneta de feltro. Neste processo, a fresa efetuou sempre movimentos paralelos e pouco espaçados entre si, daí resultando a rugosidade presente nos painéis finais [Figura 3.59].

**Figura 3.59\_**

Processo de fresagem dos painéis acústicos.

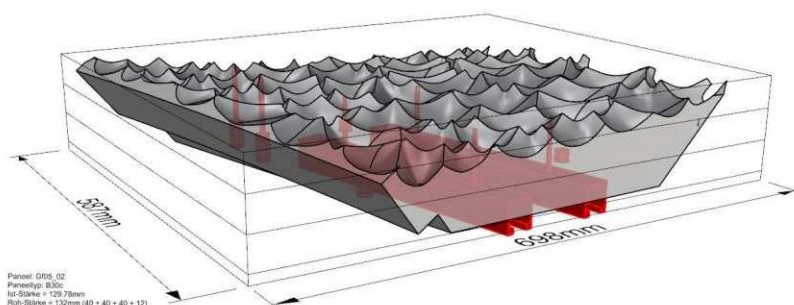


A integração dos processos de fabricação CNC permitiu que durante a fabricação e montagem, apenas 20 dos 10.000 painéis tivessem de ser



refeitos ou substituídos, demonstrando uma taxa de erro de apenas 0,2%. Além da redução das probabilidades de erro humano, a inclusão da tecnologias CAM permitiu o planeamento e gestão do processo de fabricação dos painéis, possibilitando uma minimização dos custos e do tempo de produção que, mesmo assim, se prolongou por mais de um ano (Georgi 2016).

A montagem dos painéis acústicos individuais requereu uma grande precisão. De modo a colocar os painéis em todos os cantos e ângulos da parede, foi desenvolvida uma subestrutura de aço e de juntas esféricas, cortadas com máquinas a laser [Figura 3.60]. O planeamento e gestão dos milhares de painéis ficou mais claro com a ajuda de códigos de barras, também eles fresados nos painéis. Deste modo, além da fácil identificação das várias peças, era possível obter a precisa localização de cada parafuso, interruptor ou luminária a ser aplicada em obra.



**Figura 3.60\_**

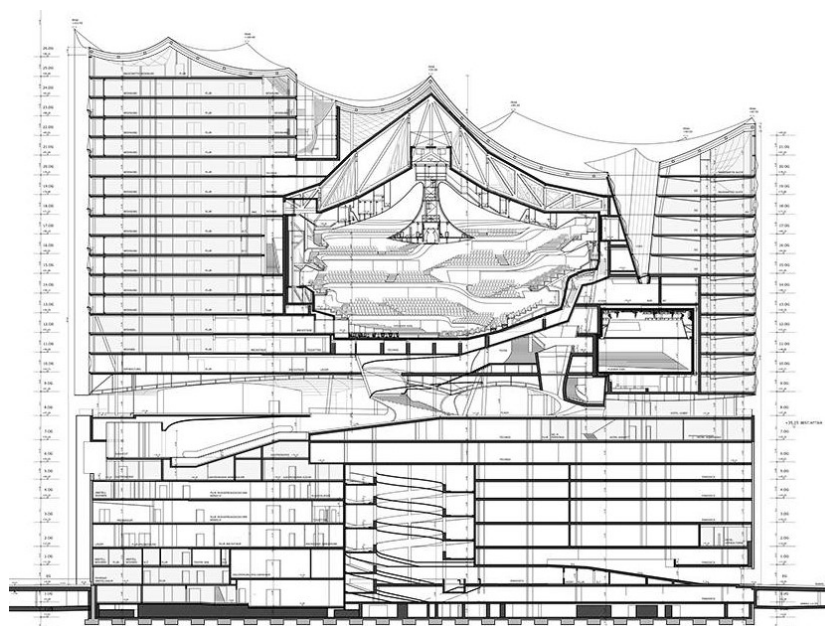
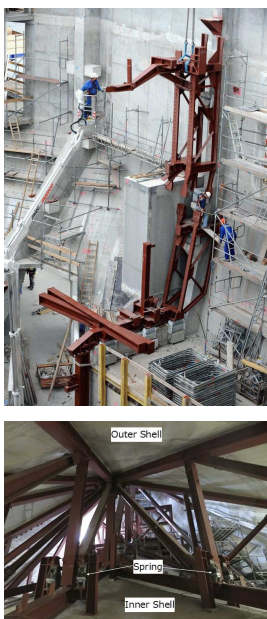
Modelo digital de um dos painéis, em Rhinoceros. A vermelho, é visível a estrutura de fixação na traseira do painel tal como o seu sistema de afinação.

Originalmente, o Kaispeicher foi construído com o intuito de suportar o peso de milhares de sacos de grãos de cacau. Contudo, aquando da construção da Elbphilharmonie, 650 novos pilares de betão armado foram adicionados aos 1.111 já existentes. Enterrados a uma profundidade de 15m abaixo do leito do rio, suportam as 200.000 toneladas do novo volume (Sealy 2013).

Por outro lado, concentrar um bloco de residências e um hotel lado a lado com um sala de concertos de 12.500 toneladas e a 50m de altura impunha várias restrições no que toca à vibração estrutural e à privacidade sonora. Face a este problema a Grand Hall, à semelhança da Recital Hall, encontra-



se desacoplada da estrutura do edifício. De modo a atingir um nível adequado de isolamento sonoro foi adotado um sistema de anti vibração que usa molas metálicas que podem ser ajustadas conforme a frequência do som emitido. O uso de molas metálicas, em detrimento de materiais isoladores de borracha, permite um isolamento mais eficaz perante frequências mais baixas, como o caso das sirenes dos navios que ali passam frequentemente. Além disso, permitem a absorção de vibrações em ambas as direções, vertical e horizontal, isolando acusticamente o volume da sala de concertos de tudo o que a rodeia. Segundo Toyota (2017), estruturalmente a Grand Hall está conformada numa estrutura de betão armado com 200mm de espessura. Por sua vez, esta “caixa” interna apoia-se em 362 molas metálicas que estão fixas a uma segunda caixa externa também com 200mm de espessura [Figura 3.61].

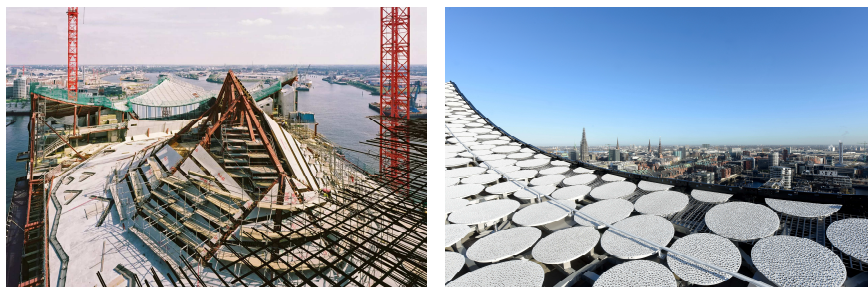


**Figura 3.61\_**

Construção da Grand Hall com as molas metálicas entre as “caixas” interna e externa.

Ocupando o núcleo do edifício, esta sala acabou igualmente por influenciar o desenho da cobertura do edifício, que teve de responder às exigências formais e espaciais da estrutura do Grand Hall. Na verdade, as linhas ondulantes da cobertura cobrem uma complexa rede de vigas de aço, dispostas em forma de estrela, que permitem a sustentação da Grand Hall sem recurso a qualquer pilar. Cada um destes 11 elementos estruturais mede até 25m de comprimento e pesa cerca de 40 toneladas. Por cima, oito

superfícies côncavas revestidas com 6.000 discos metálicos perfurados, de cor branca, finalizam a cobertura de 7.000 metros quadrados conferindo-lhe uma sensação de movimento [Figura 3.62].



**Figura 3.62\_**  
Pormenor da estrutura da  
Grand Hall em construção.

Para além do trabalho acústico pelo qual a Elbphilharmonie se destaca, o projeto possui ainda outras características de notável conceção e fabricação, que lhe conferem carácter e proporcionam um desempenho performativo melhorado. Um desses aspetos é a fachada de vidro, pontuada por várias aberturas em pontos específicos do edifício que geram pequenos terraços de perfil em “U” e favorecem a ventilação natural. Estas aberturas são fornecidas pelo vidro de 48mm de espessura que ondula como uma cortina. Na verdade, aproximadamente 600 painéis de vidro passaram por um processo de fundição a cerca de 600°C e com um rigor milimétrico, daí resultando o efeito “derretido” do vidro. Cada um destes painéis de vidro pesa cerca de 1,2 toneladas e foi pensado para resistir a ventos de 150km/h. Por outro lado, como forma de evitar o desvirtuamento projetual que os sistemas tradicionais de sombreamento dariam, os painéis envidraçados apresentam pequenos pontos serigrafados de acabamento espelhado que protegem a estrutura do sobreaquecimento refletindo a luz solar e criando, simultaneamente, uma variação da sua tonalidade à medida que as reflexões sobre o vidro se alteram. Este efeito visual foi obtido através da análise e otimização computacional que ditou a disposição dos pontos para cada um dos painéis tendo em conta a sua posição no edifício e incidência solar exigidas para os espaços anexos [Figura 3.63]. Ambos os aspetos permitem à fachada do edifício, adaptar-se às circunstâncias de cada espaço, reduzindo ganhos de energia no verão e garantindo algum isolamento térmico no inverno, enquanto proporciona a ventilação natural e um aumento da sensação de conforto nos espaços.

## Projetar com o Invisível

### Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto

**Figura 3.63\_**

No total, a superfície envidraçada da fachada é constituída por 1.100 painéis de vidro serigrafado. Incluem ainda um sistema manual que permite a renovação do ar.

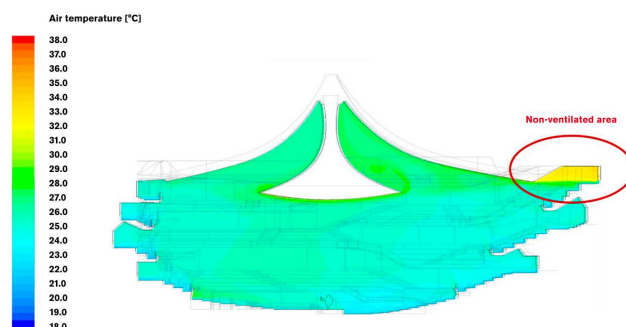


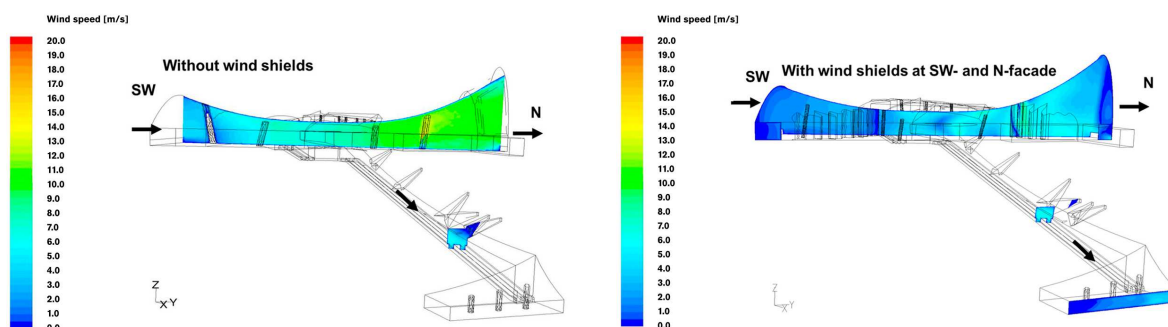
Continuando nas questões de conforto, foram ainda desenvolvidas algumas análises CFD para as principais áreas de utilização do edifício. Na Grand Hall, foi possível identificar e avaliar a temperatura interior ao longo dos vários espaços, verificando-se que a mesma se manteria praticamente constante em todas as zonas da plateia [Figura 3.64]. Por outro lado, foi possível verificar a existência de algumas áreas não ventiladas que, tendo em conta a sua localização, não impunham uma grande agravante no desempenho global térmico (*Transsolar s.d.*).

Outro foco desta análise e otimização foi a exposição aos ventos da praça pública elevada e das entradas dos *foyers*. A análise constatou que sem qualquer elemento de proteção, a praça tornava-se desconfortável devido à ação dos ventos. A solução final, com a adoção de painéis de vidro ondulados que protegem o interior da praça das variações do vento, provou ser uma boa solução na atenuação da ação do vento [Figura 3.65]. Em última análise, estas simulações foram determinantes na validação e adequação de algumas das decisões arquitetónicas da obra, conferindo-lhe uma identidade única.

**Figura 3.64\_**

Análise da temperatura no interior da Grand Hall.





A análise do edifício Elbphilharmonie demonstra como as várias exigências performativas podem ser integradas num único sistema colaborativo. Se, por um lado, a consideração da acústica foi essencial na organização espacial e funcional do edifício, por outro, também a questão das forças e do sol estiveram presentes no desenho e, por isso, foram articuladas com os restantes temas performativos. Assim, concluímos que o “projetar com o som” vai muito além das questões intuitivas e, por isso, necessita de ser encarada como uma questão essencial ao conforto de qualquer espaço desenhado.

Apesar de largamente ultrapassado o orçamento inicial de 77M €, a Elbphilharmonie é hoje um dos ex-líbris da cidade de Hamburgo e da arquitetura contemporânea. Apoiada na capacidade performativa das tecnologias digitais, além da sua forma apelativa, a otimização acústica realizada na Grand Hall coloca-a, atualmente, como uma das melhores salas de concertos em todo o mundo.

**Figura 3.65\_**

Análise da velocidade do vento na praça pública elevada, sem e com elementos de proteção.

*“I know that I have done my job as an acoustician well when audiences no longer perceive the large distance to the music.”*

Yasuhisa Toyota (*Elbphilharmonie s.d.*)



### 3.3 \_ Experiência Pessoal

Partindo de um desejo de introdução das questões de desempenho no contexto de ensino da FAUP, durante esta dissertação tive a oportunidade de colaborar com o Prof. José Pedro Sousa na realização de um pequeno exercício para a unidade curricular de Geometria Construtiva do 3ºano (2017/2018). Neste exercício, com a duração de 5 aulas, os alunos tiveram um primeiro contacto com programas de análise do “invisível”, em âmbito académico.

O exercício realizou-se em ambiente de modelação do Rhinoceros e Grasshopper, com os quais os alunos têm vindo a contactar ao longo da unidade curricular. Organizados em grupos, o trabalho consistiu em criar uma forma livre, fazendo uso das capacidades de *form-finding* do *plug-in* SmartForm e adequando a geometria da forma gerada consoante as exigências solares estabelecidas durante o desenvolvimento projetual, analisadas através do *plug-in* DIVA.

De realçar que a preparação deste exercício passou também por um processo de pesquisa e seleção de programas de análise de performance. Assim, para o desempenho das forças, além do SmartForm foi também testado o *plug-in* Kangaroo. No entanto, dada a duração do exercício e por se tratar da primeira abordagem dos alunos perante uma ferramenta de análise performativa, optou-se pelo SmartForm, por apresentar uma interface mais intuitiva e de rápida aprendizagem. No que toca ao projetar com o sol, estudaram-se os *plug-ins* Ladybug e Honeybee, tendo-se constatado a sua potencialidade em abranger uma grande variedade de fatores de desempenho solar. No entanto, para uma primeira familiarização considerou-se mais indicado avançar com o DIVA.

A fase inicial do exercício passou pela aprendizagem do *software*. Além da apresentação de alguns exemplos concebidos durante os estudos prévios das ferramentas, foram também explicadas as possibilidades que a consideração das preocupações performativas e a integração das tecnologias de análise digital fornecem ao arquiteto na conceção do projeto digital. Para uma melhor aprendizagem dos programas, foi fornecida e



## Projetar com o Invisível

### Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto

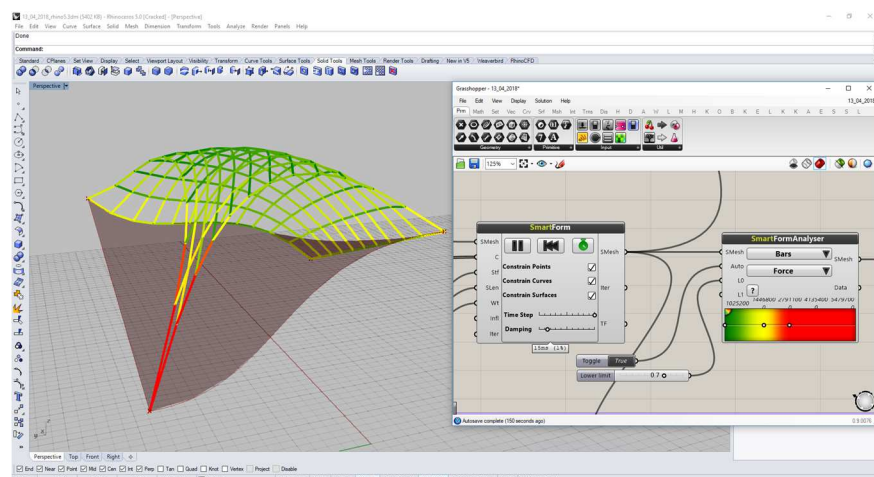
devidamente explicada uma definição paramétrica muito simples. Durante as restantes aulas os grupos puderam desenvolver e discutir os seus projetos e tirar algumas dúvidas que pudessem surgir quanto ao funcionamento das ferramentas.

No ambiente paramétrico do Grasshopper, a alteração de alguns critérios possibilitou o apurar de uma forma otimizada, tendo em conta o seu desempenho face às exigências estruturais e solares.

O SmartForm ofereceu a possibilidade de geração de várias análises relativas ao desempenho estrutural e geométrico da estrutura. Dependendo da forma base pretendida e da relação da estrutura com o espaço envolvente, os alunos puderam alterar vários parâmetros, como a geometria base da estrutura, os pontos de ancoragem, o tipo de malha utilizada assim como a possibilidade de incluir aberturas nesta mesma malha [Figura 3.66]. Daí resultaria uma forma que, num segundo momento, seria avaliada pelo mesmo *plug-in*. Esta avaliação podia recair sobre vários fatores – como a inclinação das faces, torção, resistência, deflexões, cargas, entre outras – as quais os grupos podiam analisar e reajustar o projeto consoante as suas próprias imposições conceptuais.

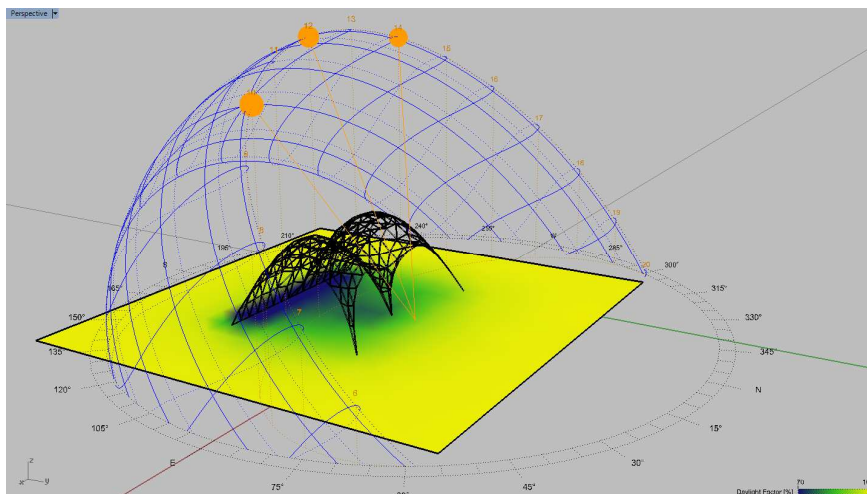
**Figura 3.66\_**

Software SmartForm.  
Desenvolvido pelo grupo  
SMART, da BuroHappold.



Por outro lado, o *plug-in* DIVA permitia, rapidamente, criar uma imagem colorida codificada de acordo com os índices de incidência solar na superfície da assentamento da estrutura [Figura 3.67]. Como os valores de radiação solar variam no tempo e no espaço, os valores obtidos desta

análise espelham a localização selecionada pelos grupos de trabalho para a construção hipotética da estrutura.



**Figura 3.67\_**

Exemplo de uma análise solar realizada através do software DIVA.

No final, os trabalhos produzidos foram apresentados sob a forma de cartaz, fazendo uso de imagens e esquemas explicativos do processo desenvolvido e guiado com base no comportamento “invisível” das forças e do sol. A conjugação de ambas as ferramentas, possibilitou a criação de uma grande diversidade de formas que resultaram da consideração e simulação direta das questões estruturais e solares que, de outra forma, os alunos não teriam a possibilidade de visualizar tão facilmente.

Através deste exercício constatou-se o interesse dos alunos perante as componentes performativas no projeto. Por outro lado, evidenciou uma capacidade de aprendizagem rápida dos alunos perante *softwares* que apresentam interfaces progressivamente mais intuitivas e de fácil compreensão. Embora realizado a título experimental, no futuro, o exercício poderá ser combinado com o trabalho em desenvolvimento noutras unidades curriculares, dotando os alunos de uma capacidade de integração interdisciplinar já em contexto académico, propiciada pelo digital e pelo “invisível”.

Com isto, além de disfrutar de uma ajuda suplementar no desenvolvimento dos seus projetos, o aluno é também alertado da consciencialização integradora das questões performativas no processo de projeto, dotando-o de competências complementares para o seu futuro profissional.

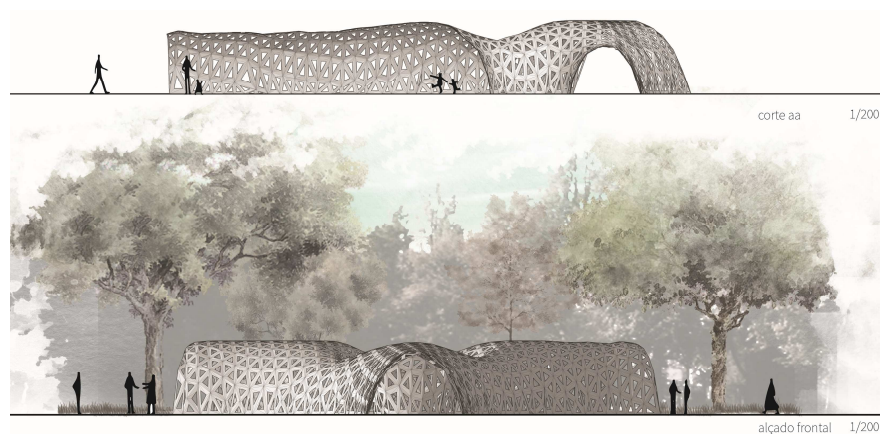


## Projetar com o Invisível

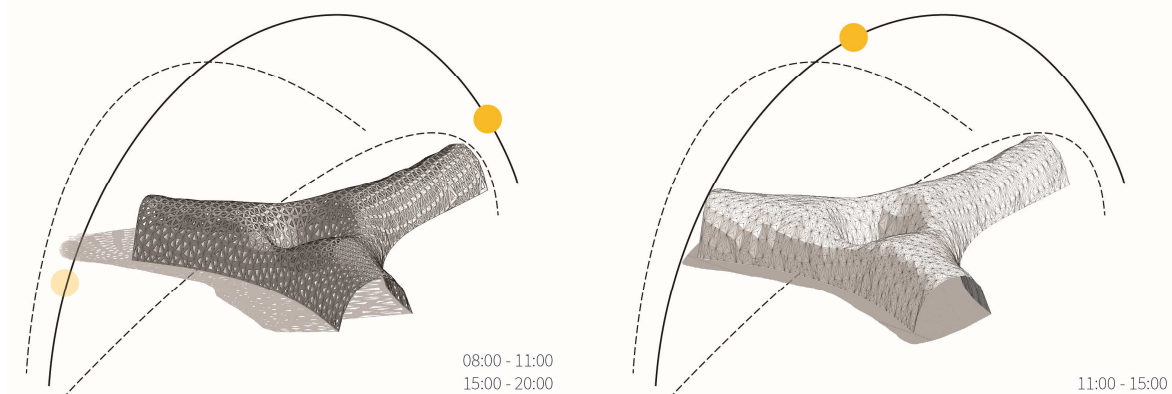
### Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto

**Figura 3.68\_**

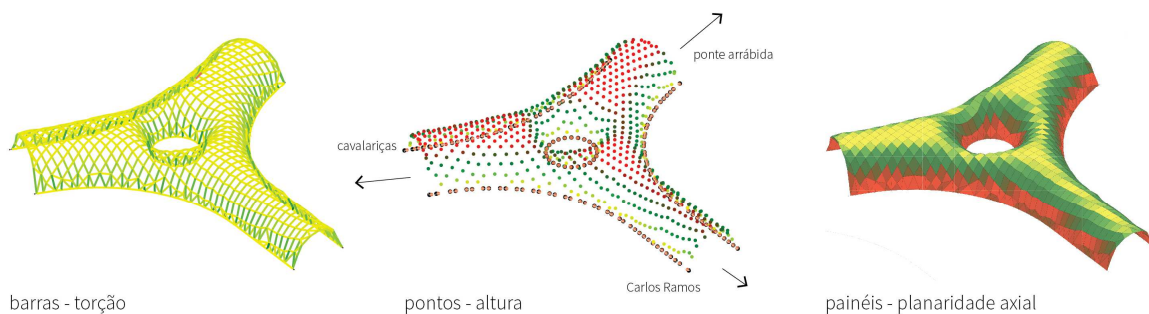
Trabalho realizado pelos  
alunos: Luiz Machado e  
António Costa.

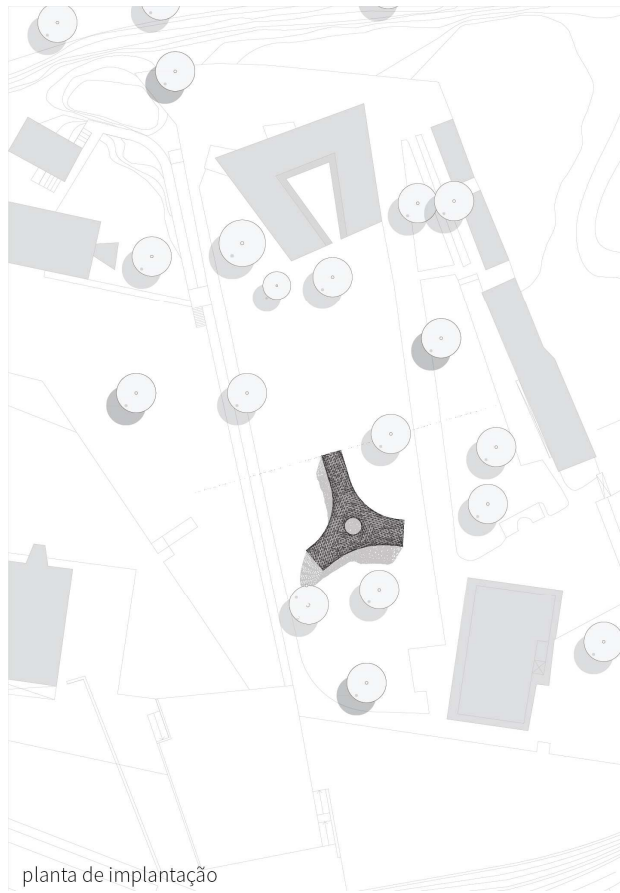


variação do painel conforme a incidência de luz solar

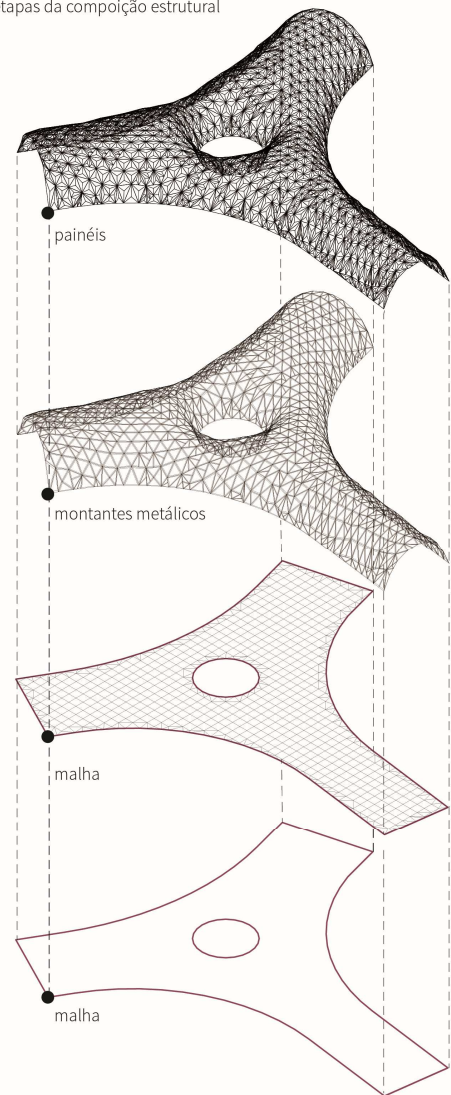


diagramas de estudo da forma geradora



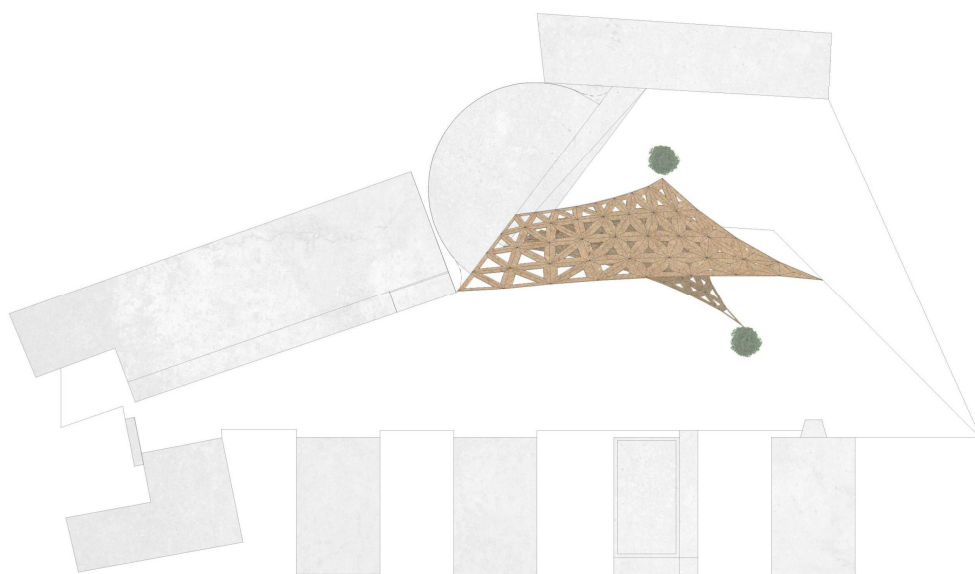
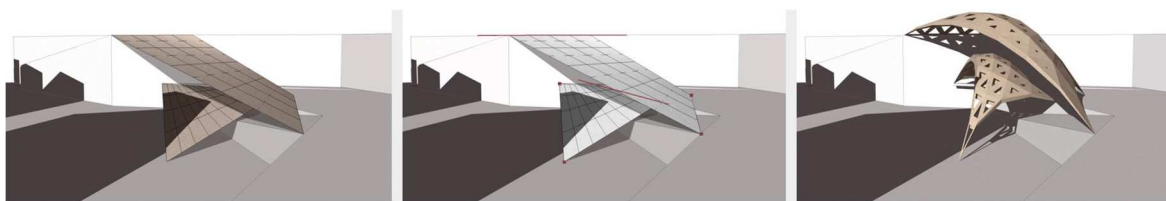


etapas da composição estrutural





**Projetar com o Invisível**  
Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto



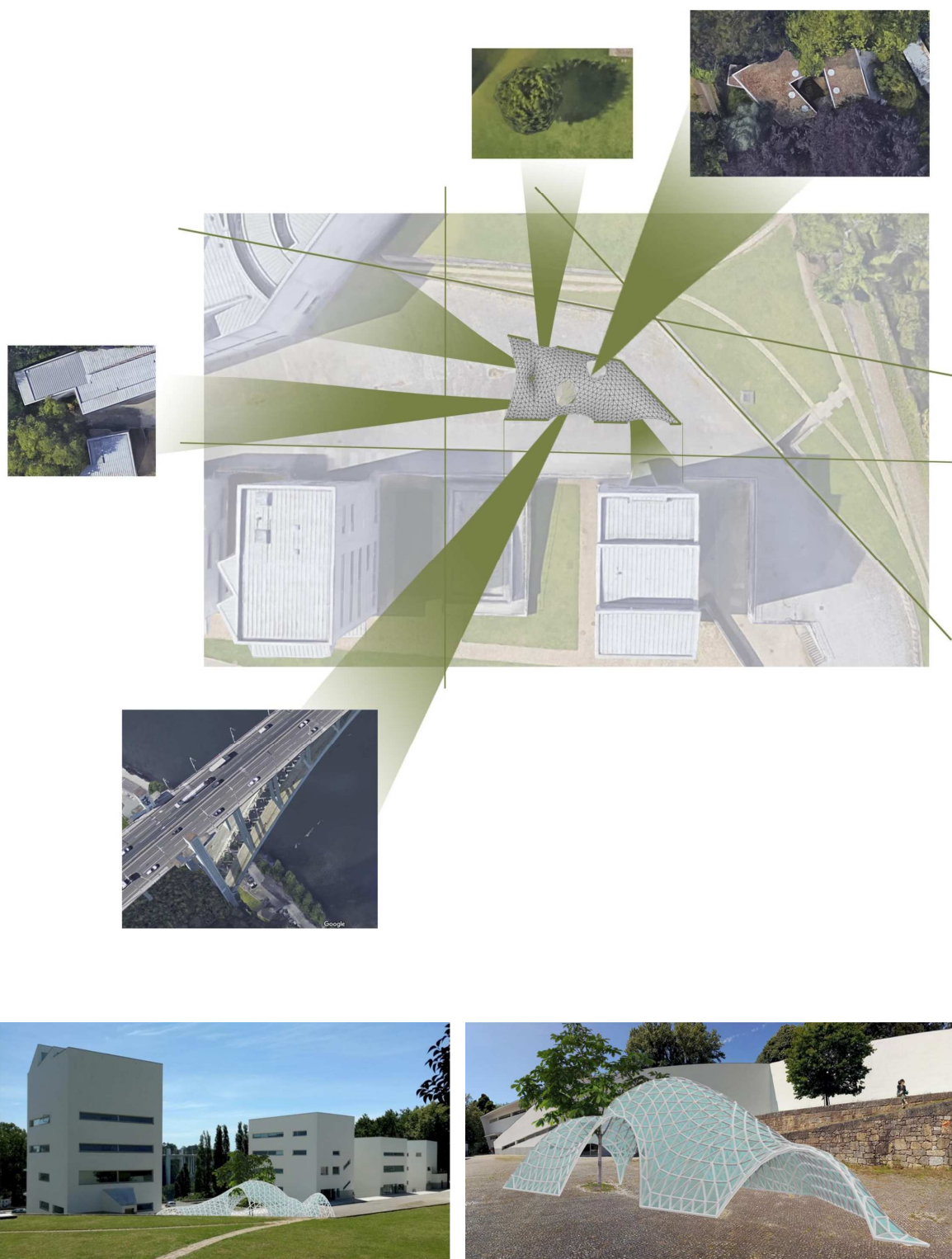
**Figura 3.69\_**

Trabalho realizado pelos  
alunos: Carlos Guilherme,  
Inês Carneiro, Maria  
Trindade e Mónica Dias.

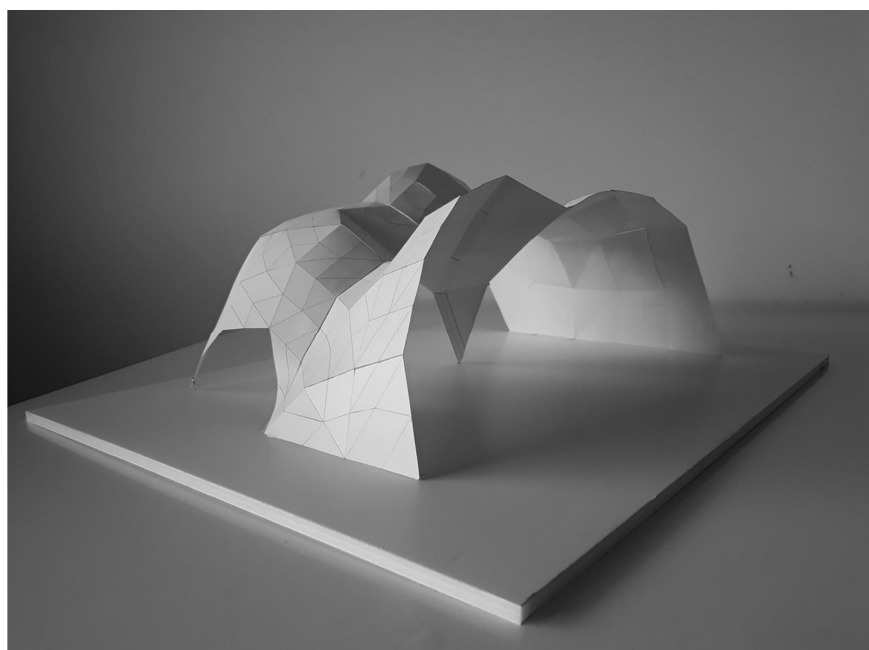


**Figura 3.70\_**

Trabalho realizado pelos  
alunos: André Moreira,  
Cláudia Duarte, Duarte  
Almeida e Inês Costa.



**Projetar com o Invisível**  
Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto







## **CAPÍTULO 4 \_ CONSIDERAÇÕES FINAIS**





O tema explorado nesta dissertação resultou de uma reflexão crítica face às exigências que, atualmente, se colocam à arquitetura e à sua relação com as tecnologias digitais disponíveis. Motivado pelo desenvolvimento exponencial da tecnologia e pela busca de uma melhor compreensão pessoal sobre o funcionamento do processo de projeto, este trabalho procurou entender de que modo o desenho de arquitetura pode beneficiar com a consideração da performance enquanto ferramenta de desenho.

Deste modo, a investigação iniciou-se pela discussão de dois conceitos: o *desenho* e a *performance*, relacionando-os ao longo da evolução da relação histórica entre arquiteto e engenheiro. Desta separação interdisciplinar a dissertação evoluiu no sentido da sua integração, denunciada pela inclusão da performance no processo projetual e que foi reforçada na descrição processual dos três casos de estudo apresentados.

Com os estudos apresentados no capítulo 2.2, arquitetos e engenheiros revelaram uma preocupação com o domínio das questões performativas e uma necessidade em materializar e visualizar o seu comportamento. Daí surgiram novas formas que refletem os materiais existentes e as técnicas e metodologias de análise analógica utilizadas, que vieram possibilitar a construção de novos conceitos formais. A apresentação dos seus trabalhos foi também importante no estabelecimento da ideia de que ao longo da história a linguagem arquitetónica tem espelhado o grau de consideração da performance na conceção das ideias, exibindo uma complementaridade entre arte e ciência.

Desde Vitruvius que um dos objetivos da arquitetura é a construção de espaço confortável por isso, sendo o arquiteto o responsável principal pela sua idealização, torna-se fundamental ter a capacidade de prever as sensações provocadas no seu utilizador. Sensações estas que vão muito além do tangível. Como referido anteriormente, o desenho de projeto não é apenas uma expressão estética e formal mas o resultado de um desempenho que se ambiciona em simultâneo. Arquiteto e engenheiro podem agora trabalhar em consonância apartir do mesmo modelo digital, disponível à distância de um clique e que engloba todas as especialidades patentes no projeto.

## **Projetar com o Invisível**

### **Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto**

Com o conhecimento teórico disciplinar e o crescente domínio sobre as tecnologias digitais, o arquiteto pode antever alguns dos problemas que o engenheiro lhe coloca, evitando alterações posteriores inesperadas provenientes da análise aprofundada das especialidades. Ao invés de se focar única e exclusivamente no desenho e relegar toda a análise digital para depois, o arquiteto tem a oportunidade de se aproximar do controle das questões de performance.

Assim, do ponto de vista do arquiteto, a integração das ferramentas de análise da performance no processo de projeto confere-lhe uma capacidade de antecipação sobre as questões da performance, que são determinantes na percepção de conforto e bem-estar de um espaço. Simultaneamente, neste sistema de integração, o papel do arquiteto no processo de projeto é redefinido e reforçado, adquirindo uma maior responsabilidade sobre o projeto de arquitetura.

É importante afirmar que o aumento de responsabilidade do arquiteto pelo projeto, não anula a profissão do engenheiro. A integração da performance apenas facilita a comunicação e o diálogo entre áreas disciplinares. Deste modo, pela ótica do engenheiro, também o seu papel acaba por sair reforçado pois tem de analisar e viabilizar conceitos formais mais desenvolvidos, previamente pensados e analisados pelo arquiteto. Por este motivo, a dissertação principiou numa visão de separação e progrediu num sentido de ambição pela integração interdisciplinar.

A apresentação dos casos de estudo explorados nesta dissertação ajuda a compreender como a integração da performance funciona no contexto real da prática de arquitetura. Em todas as obras analisadas o arquiteto demonstrou sensibilidade para com os temas de performance “invisíveis” e por isso tomou-os como um instrumento de desenho e não apenas como uma mera exigência processual. Um processo que se baseou no diálogo e na partilha de conhecimento entre especialidades, o qual forneceu premissas performativas que acabaram por influenciar e encaminhar o desenho para uma forma final baseada no desempenho performativo, otimizada e mais eficiente e prazerosa.

Numa sociedade cada vez mais sensível às questões da sustentabilidade, “projetar com o invisível” vem ajudar o arquiteto a dar uma resposta mais otimizada às exigências performativas que, por sua vez, influenciam também o desempenho do edifício em termos ambientais. À medida que se acentuam as recomendações sobre os edifícios, a performance tende a ganhar maior destaque e peso no desenvolvimento de um projeto. Deste modo, o “invisível” exhibe novas diretrizes projetuais com as quais o arquiteto pode desenhar e produzir um edifício mais eficiente, sustentável e adaptado às circunstâncias atuais. Por outro lado, a consideração da performance enquanto ferramenta de desenho acaba por contagiar os restantes processos patentes no projeto, anexando a conceção, análise, produção, fabricação e construção num único sistema integrado.

Do ponto de vista académico, este trabalho pretendeu chamar a atenção para um desejável reforço no ensino de arquitetura no que à consideração pelo desempenho performativo e adequação das ferramentas digitais diz respeito. Porque vivemos numa sociedade cada vez mais tecnológica, cabe também à faculdade oferecer aos alunos a possibilidade de manuseio destas tecnologias digitais, tornando-os familiarizados com algumas das ferramentas que farão parte do seu “estirador digital” no ambiente profissional que o espera.

No caso concreto da FAUP, é ainda evidente uma presença limitada das tecnologias digitais e dos temas de desempenho no ensino de arquitetura. As questões performativas são consideradas mas não aprofundadas e os alunos continuam a guiar-se por fórmulas e teorias empíricas para corresponder às questões de desempenho nos seus projetos. A experiência pessoal desenvolvida possibilitou uma primeira aproximação às ferramentas de análise digital no ensino da FAUP. Por outro lado, revelou o interesse dos alunos perante estas ferramentas digitais de análise performativa.

Concluindo, a consideração da performance é um assunto cada vez mais fundamental na validação de um projeto de arquitetura. O uso das tecnologias digitais propicia a aplicação deste processo de integração,

## **Projetar com o Invisível**

Integrando Desenho e Performance no Processo de Projeto

potenciando a exploração de novas ferramentas digitais de análise da performance e novos métodos de desenho do projeto.

Paralelamente, a interseção disciplinar entre arquiteto e engenheiro, arte e ciência, desenho e performance introduz novas possibilidades formais, materiais e processuais ao mesmo tempo que garante um maior controle sobre questões essenciais no conforto e comodidade do espaço construído. O “projetar com o invisível” destaca o arquiteto como elemento principal do projeto, promovendo uma constante procura pelo melhor resultado e impulsionando, simultaneamente, a arquitetura contemporânea num sentido de evolução integrada.







## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Addis**, Bill (2007): *Building: 3000 Years of Design Engineering and Construction*. London: Phaidon.
- Alambeigi**, Pantea & **Zhao**, Sipei & **Bury**, Jane & **Giu**, Xiaojun (2016): “Complex Human Auditory Perception and Simulated Sound Performance Prediction”, in S. Chien et al. (eds.), *Living Systems and Micro-Utopias: Towards Continuous Designing* – Proceedings of the 21<sup>st</sup> CAADRIA Conference. Melbourne, 30 Março - 2 Abril, p. 631-640.
- Baeza**, Alberto Campo (2011): *A Ideia Construída*. Casal de Cambra: Caleidoscópio.
- Balmond**, Cecil (2002): *Informal*. Munich: Prestel.
- Banham**, Reyner (1969): *The Architecture of the Well-Tempered Environment*. London: The Architectural Press.
- Barrallo**, Javier & **Sánchez-Beitia** Santiago (2011): “The Geometry of Organic Architecture: The Works of Eduardo Torroja, Felix Candela and Miguel Fisac”, in R. Sarhangi et al. (eds.), *Conference Proceedings of Bridges 2011: Mathematics, Music, Art, Architecture, Culture*. Universidade de Coimbra, 27-31 Julho, p. 65-72.
- Behling**, Sophia & **Behling**, Stefan (2002): *Sol Power: la Evolución de la Arquitectura Sostenible*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Bialkowski**, Sebastian (2016): “Structural Optimisation Methods as a New Toolset for Architects”, in A. Herneoja et al. (eds.), *Complexity & Simplicity* – Proceedings of the 34<sup>th</sup> eCAADe Conference, Volume 2. University of Oulu, Finland, 22-26 Agosto, p. 255-264.
- Burroughs**, Jane & **Burroughs**, Mark (2012): *The New Mathematics of Architecture*. London: Thames and Hudson.
- Caetano**, Inês (2015): *DrAFT: An Algorithmic Framework for Facade Design*, Prova Final de Mestrado em Arquitetura. Lisboa: Instituto Superior Técnico de Lisboa.
- Caldas**, Luísa (2001): *An Evolution-Based Generative Design System: Using Adaptation to Shape Architectural Form*, Prova Final de Doutoramento em Arquitetura. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.
- Candela**, Félix (1993): *Arquitetura Transformable*. Sevilla: ETSAS.
- Cassinello**, Pepa (2010): *Félix Candela: Centenario/Centenary: 2010*. Madrid: Universidad Politécnica.
- Corbusier**, Le (2006): *Por uma Arquitetura*, 6<sup>a</sup> edição. São Paulo: Perspectiva.

- Edwards, Brian** (2001): *Green Architecture* (Architectural Design). London: John Wiley & Sons.
- Fasoulaki, Eleftheria** (2008): *Integrated Design: A Generative Multi-Performative Design Approach*, Prova Final de Mestrado em Arquitetura. s.l.: Massachusetts Institute of Technology.
- Fernández-Galiano, Luis** (eds.) (2017): *Soundscapes: New Buildings for Music in Europe* (Arquitectura Viva 193). Madrid: Arquitectura Viva SL.
- Ganshirt, Christian** (2007): *Tools for Ideas: an Introduction to Architectural Design*. Basel: Birkhauser.
- Garber, Richard** (2017): *Workflows: expanding architecture's territory in the design of buildings* (Architectural Design). London: John Wiley & Sons.
- Hensel, Michael & Menges, Achim** (2006): *Morpho-Ecologies: Towards Heterogeneous Space in Architectural Design*. London: AA Publications.
- Hensel, Michael** (2013): *Performance-Oriented Architecture: Rethinking Architectural Design and the Built Environment* (Architectural Design). West Sussex: John Wiley & Sons.
- Hillier, Bill** (1976): *Space Syntax*. London: University College London.
- Ito, Toyo** (2011): *Tarzans in the Media Forest* (Architecture Words 8). London: AA Publications.
- Januszkiewicz, Krystyna & Banachowicz, Marta** (2017): "Nonlinear Shaping Architecture Designed with Using Evolutionary Structural Optimization Tools", in *IOP Conference Series: Materials, Science and Engineering* 245 082042. University of Technology in Szczecin, 12-16 Junho.
- Jurgensen, Peter** (1986): *The Conceptual design of Architectural Form: A Performance Spec for a Computer System*, Prova Final de Bacharelato. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.
- Kalay, Yehuda** (2004): *Architecture's New Media: principles, theories, and methods of computer-aided design*. Massachusetts: The MIT Press.
- Kolarevic, Branko** (2003): *Architecture in the digital age: Design and Manufacturing*. Abingdon: Taylor & Francis, Inc.
- Kolarevic, Branko & Malkawi, Ali** (2005): *Performative Architecture: Beyond Instrumentality*. New York: Taylor & Francis, Inc.
- Lee, Kunwoo** (1999): *Principles of CAD/CAM/CAE Systems*. s.l.: Addison Wesley Longman.
- Levy, Matthys & Salvadori, Mario** (2002): *Why Buildings Fall Down: How Structures Fail*. New York: W.W. Norton & Company.

- Liddell, Ian & McCormick, Fergus** (2012): “Special Steel Structures”, in B. Davidson et al. (eds.), *Steel Designers’ Manual: The Steel Construction Institute, Seventh Edition*. Oxford.
- Monks, Michael** (1999): *Audiopimization: Goal-Based Acoustic Design*, Prova Final de Doutoramento em Arquitetura. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.
- Nerding, Winfried** (2005): *Frei Otto. Complete Works: Lightweight Construction: Natural Design*. Basel: Birkhauser.
- Otto, Frei** (1971): *Biology and Building*, Institute for Lightweight Structures. s.l.: University of Stuttgart.
- Pasternak, Agata** (2016): “Optimization of the Building in Relation to the Insolation Conditions of Premises in Adjacent Buildings”, in A. Herneoja et al. (eds.), *Complexity & Simplicity – Proceedings of the 34<sup>th</sup> eCAADe Conference, Volume 2*. University of Oulu, Finland, 22-26 Agosto, p. 371-378.
- Pavani, Raffaella & Rossi-Costa Luisa** (2018): “The Masonry Domes Over the Centuries: The Important Role of Geometry”, in L. Cocchiarella (ed.), *ICGG 2018 – Proceedings of the 18<sup>th</sup> ICGG*. Milan, Italia, 03-07 Agosto, p. 2051-2060.
- Peters, Terri & Peters, Brady** (2018): *Computing the Environment: Digital Design Tools for Simulation and Visualisation of Sustainable Architecture* AD Smart, London: John Wiley & Sons.
- Petroski, Henri** (1992): *To Engineer is Human: The Role of Failure in Successful Design*. New York: Vintage Books.
- Polião, Marco Vitruvius** (1999): *Da arquitetura*. Trad. Marco Aurélio Lagonegro, apres. Júlio Roberto Katinsky (Estudos Urbanos: 7). São Paulo: Hucitec.
- Rice, Peter** (1994): *An Engineer Imagines*. London: Artemis.
- Robbins, Edward** (1997): *Why Architects Draw*. Massachusetts: The MIT Press.
- Rodrigues, Nuno** (2014): *A evolução digital no processo de projeto: do CAD ao BIM*, Prova Final de Mestrado em Arquitetura. Porto: FAUP.
- Salvadori, Mario** (1991): *Why Buildings Stand Up: Strength of Architecture: Strength of Architecture from the Pyramids to the Skyscraper*. New York: W.W. Norton & Company.
- Sasaki, Mutsuro** (2007): *Morphogenesis of Flux Structures*. London: AA Publication.
- Schittich, Christian & Breising, Christian** (2013): *Building Design at Arup* (Detail Engineering 2). Munich: DETAIL.

- Shireen**, Naghmi & **Erhan**, Halil & **Botta**, David & **Woodbury**, Robert (2012): “Parallel Development of Parametric Design Models using Subjunctive Dependency Graphs”, in *Synthetic Digital Ecologies – Proceedings of the 32<sup>nd</sup> ACADIA Conference*. San Francisco, 8-21 Outubro, p. 57-66.
- Siza**, Álvaro (2018): *02 Textos*. Lisboa: Parceria A.M.Pereira.
- Songel**, Juan María (2010): *A Conversation with Frei Otto*. New York: Princeton Architectural Press.
- Sousa**, José Pedro (2010): *From Digital to Material: Rethinking Cork in Architecture through the use of CAD/CAM Technologies*, Prova Final de Doutoramento em Arquitetura, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- Távora**, Fernando (2006): *Teoria Geral da Organização do Espaço*. Porto: FAUP Publicações.
- Terzidis**, Kostas (2003): *Expressive Form: a conceptual approach to computational design*. New York: Spoon Press.
- Terzidis**, Kostas (2006): *Algorithmic Architecture*. Oxford: Architecture Press.
- Todisco**, Leonardo (2016): *Funicularity and Equilibrium for High-Performance Conceptual Structural Design*, Prova Final de Doutoramento, Technical University of Madrid. Madrid: School of Civil Engineering.
- Zellner**, Peter (1999): *Hybrid Space: New forms in digital architecture*. London: Thames and Hudson.
- Zerbst**, Rainer (1993): *Gaudí: 1852-1926: Antoni Gaudí i Cornet – Uma vida na Arquitectura*. Köln: Taschen.

## Electrónica

- Barker**, Don (2003): *Foster's New City Hall*, Architecture Week. Consultado 24 Maio 2018, <[http://www.architectureweek.com/2003/0226/design\\_1-3.html](http://www.architectureweek.com/2003/0226/design_1-3.html)>.
- Design Build Network** (2010): *Qatar National Convention Centre*. Consultado 05 Maio 2018, <<https://www.designbuild-network.com/projects/qatarnationalconvent/>>.
- Duesing**, Brett (2009): *Topologica*, Obleo Design Media. Consultado 14 Abril 2018, <<http://obleopr.com/2009/05/topologica/>>.
- Elbphilharmonie** (s.d): Elbphilharmonie. Consultado 10 Março 2018, <<https://www.elbphilharmonie.de/en/elbphilharmonie>>.
- Foster+Partners** (2002a): *City Hall handed over to Government Office for London on time and on budget*. Consultado 28 Abril 2018, <<https://www.fosterandpartners.com/news/archive/2002/05/city-hall-handed-over-to-government-office-for-london-on-time-and-on-budget/>>.
- Foster+Partners** (2002b): *City Hall officially opened by Her Majesty the Queen*. Consultado 28 Abril 2018, <<https://www.fosterandpartners.com/news/archive/2002/07/city-hall-officially-opened-by-her-majesty-the-queen/>>.
- Georgi**, Oliver (2016): *Wo zehntausend Tone unter die weibe Haut gehen*, Franffurter Allgemeine. Consultado 28 Maio 2018, <<http://www.faz.net/aktuell/technik-motor/akustik-in-der-elbphilharmonie-wo-zehntausend-toene-unter-die-weisse-haut-gehen-14164587.html>>.
- Lane**, Tom (2009): *Steel Yourself: The Qatar National Convention Centre*, Building. Consultado 15 Julho 2018, <<https://www.building.co.uk/focus/steel-yourself-the-qatar-national-convention-centre/3137052.article>>.
- McKay**, Graham (2012): *The Things Architects Do #4: Concepts*, Misfits' Architecture. Consultado 18 Julho 2018, <<https://misfitsarchitecture.com/tag/qatar-national-convention-centre/>>.
- Quirk**, Vanessa (2012): *A Brief History of BIM*, ArchDaily. Consultado 03 Abril 2018, <<https://www.archdaily.com/302490/a-brief-history-of-bim/>>.
- Sealy**, Peter (2013): *Elbphilharmonie Hamburg*, Oris Magazine 83. Consultado 2 Junho 2018, <[http://www.oris.hr/en/oris-magazine/overview-of-articles/\[86\]elbphilharmonie-hamburg,1240.html#](http://www.oris.hr/en/oris-magazine/overview-of-articles/[86]elbphilharmonie-hamburg,1240.html#)>.
- Smith**, Susan (2008): *Engineering Sidra Trees*, Architecture Week. Consultado 18 Junho 2018, <[http://www.architectureweek.com/2008/0227/tools\\_1-1.html](http://www.architectureweek.com/2008/0227/tools_1-1.html)>.

- Stephens**, Suzanne (2016): *Elbphilharmonie by Herzog & de Meuron*, Architectural Record. Consultado 04 Junho 2018, <<https://www.architecturalrecord.com/articles/11986-elbphilharmonie-by-herzog-de-meuron>>.
- Stevens**, Philip (2016): *herzog & de meurons's elbphilharmonie moves to completion ahead of 2017 opening*, DesignBoom. Consultado 12 Junho 2018, <<https://www.designboom.com/architecture/herzog-de-meuron-elbphilharmonie-hamburg-concert-hall-germany-02-10-2016/>>.
- Stinson**, Elizabeth (2017): *What happens when algorithms design a concert hall? The stunning Elbphilharmonie*, Wired. Consultado 25 Março 2018, <<https://www.wired.com/2017/01/happens-algorithms-design-concert-hall-stunning-elbphilharmonie/>>.
- Toyota**, Yasuhisa (2017): *News 17-02, Elbphilharmonie Opens in Hamburg*, Nagata Acoustics. Consultado 20 Abril 2018, <[http://www.nagata.co.jp/e\\_news/news1702-e.html](http://www.nagata.co.jp/e_news/news1702-e.html)>.
- Transsolar** (s.d.): Elbphilharmonie, Hamburg, Germany. Consultado 20 Junho 2018, <<https://transsolar.com/projects/concert-hall-elbphilharmonie>>.
- Uncube** (2014): *Magazine No.21: Acoustics*, Uncube. Consultado 18 Julho 2018, <<http://www.uncubemagazine.com/sixcms/detail.php?id=12784433&articleid=art-1398158227011-e914408a-86e3-484d-84e5-e3b35087ce65#!/page4>>.
- Wainwright**, Oliver (2016): *We thought it was going to destroy us'...Herzog and De Meuron's Hamburg Miracle*, The Guardian. Consultado 18 Junho 2018, <<https://www.theguardian.com/artanddesign/2016/nov/04/hamburg-elbphilharmonie-herzog-de-meuron-a-cathedral-for-our-time>>.

## **\_Videos**

*Acoustic Study of the Greater London Authority (GLA) building*, ARUP Acoustics, [video online], consultado 10 Maio 2018, <<http://www.uncubemagazine.com/sixcms/detail.php?id=12784433&articleid=art-1398158227011-e914408a-86e3-484d-84e5-e3b35087ce65#!/page20>>







## REFERÊNCIAS DE IMAGENS

### Capítulo 1 \_ Introdução

**Figura 1.1\_** Imagem do autor.

### Capítulo 2 \_ Desenho e Performance

**Figura 2.1\_** Rodrigues 2014, p.24.

**Figura 2.2\_** <https://www.treehugger.com/natural-sciences/nature-blows-my-mind-miracles-termite-mounds.html> (esquerda) Addis 2007, p.35. (direita)

**Figura 2.3\_** <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/13.150/4508>

**Figura 2.4\_** [https://livingthing.danmackinlay.name/special\\_functions.html](https://livingthing.danmackinlay.name/special_functions.html) (cima)  
<https://alexnlld.com/product/12-inch-30cm-aluminium-tri-scale-metal-ruler-architect-engineers-technical-rule/> (baixo) <http://blog.misumiusa.com/computer-aided-design-pt-1-design-before-computer-aided/> (direita)

**Figura 2.5\_** <http://www.portalgaudi.cat/en/buildings/la-pedreira/> (esquerda)  
<https://www.archdaily.com.br/br/784944/classicos-da-arquitetura-parque-guell-antoni-gaudi> (baixo, direita)

**Figura 2.6\_** <https://www.marcopolo.de/reisefuehrer-tipps/santa-coloma-de-cervello/crypta-gaudi-de-la-colonia-guell-poi-121317073.html> (esquerda) <http://www.catalunya.com/crypta-de-la-colonia-guell-17-16003-155?language=ru> (direita)

**Figura 2.7\_** <http://www.ordemengenheiros.pt/pt/atualidade/noticias/ponte-salazar-ponte-25-de-abril/>

**Figura 2.8\_** Addis 2007, p.207.

**Figura 2.9\_** <https://gmsaarquitectura.wordpress.com/2013/10/10/el-presente-de-las-impresoras-3d/>

**Figura 2.10\_** <http://www.sagradafamilia.org/en/geometry/>

**Figura 2.11\_** <https://www.archdaily.com/438992/ad-classics-la-sagrada-familia-antoni-gaudi>

**Figura 2.12\_** <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/hipodromo-de-la-zarzuela/>

**Figura 2.13\_** Addis 2007, p.493. (esquerda)  
[https://www.urbipedia.org/hoja/Front%C3%B3n\\_Recoletos](https://www.urbipedia.org/hoja/Front%C3%B3n_Recoletos) (direita)

**Figura 2.14\_** <https://www.archdaily.com/496202/ad-classics-los-manantiales-felix-candela> (esquerda, meio) <https://es.paperblog.com/capilla-en-lomas-de-cuernavaca-de-candela-1907041/> (direita)

**Figura 2.15\_** [https://www.researchgate.net/figure/Experimental-shell-structure-by-the-Spanish-architect-Felix-Candela-Las-Aduanas-Mexico\\_fig1\\_284763104](https://www.researchgate.net/figure/Experimental-shell-structure-by-the-Spanish-architect-Felix-Candela-Las-Aduanas-Mexico_fig1_284763104)

**Figura 2.16\_** <http://www.romemuseumguide.com/pier-luigi-nervi-architecture-sport/> (cima) Addis 2007, p.496. (baixo)

**Figura 2.17\_** [https://www.archiportale.com/news/2011/07/eventi/a-lecce-una-mostra-monografica-su-pier-luigi-nervi\\_23522\\_32.html](https://www.archiportale.com/news/2011/07/eventi/a-lecce-una-mostra-monografica-su-pier-luigi-nervi_23522_32.html) (esquerda) Addis 2007, p.495. (direita)

**Figura 2.18\_** <https://www.archdaily.com/610531/frei-otto-and-the-importance-of-experimentation-in-architecture> (esquerda) <http://radical-pedagogies.com/search-cases/e14-institute-lightweight-structures-university-stuttgart-ilek/> (meio/esquerda) <https://www.grasshopper3d.com/forum/topics/frei-otto-bubbles?page=1&commentId=2985220%3AComment%3A1856899&x=1#2985220Comment1856899> (meio/direita) <https://aut.cc/veranstaltungen/form-follows-nature> (direita)

**Figura 2.19\_** <https://www.detail-online.com/article/research-development-and-daring-frei-otto-wins-the-pritzker-prize-26524/#> (esquerda) <https://www.archdaily.com/623689/ad-classics-german-pavilion-expo-67-frei-otto-and-rolf-gutbrod> (direita)

**Figura 2.20\_** <https://www.detail-online.com/article/research-development-and-daring-frei-otto-wins-the-pritzker-prize-26524/#> (esquerda) <https://www.mimoo.eu/projects/Germany/Munich/Olympic%20Stadium%20Munich/> (direita)

**Figura 2.21\_** <http://www.smdarq.net/blog/case-study-mannheim-multihalle/> (esquerda) <http://mannheim-multihalle.de/en/process/the-architects/> (direita)

**Figura 2.22\_** [https://motherboard.vice.com/en\\_us/article/wnj7em/recreating-the-surreal-ice-sculptures-of-heinz-isler](https://motherboard.vice.com/en_us/article/wnj7em/recreating-the-surreal-ice-sculptures-of-heinz-isler) (esquerda) [https://www.baunetz.de/meldungen/Meldungen-Zum\\_Tod\\_von\\_Heinz\\_Isler\\_791805.html?bild=3](https://www.baunetz.de/meldungen/Meldungen-Zum_Tod_von_Heinz_Isler_791805.html?bild=3) (meio) <https://structurae.net/structures/norwich-sports-village-hotel> (direita)

**Figura 2.23\_** <https://n0310093.weebly.com/blog/heinz-isler>

**Figura 2.24\_** Behling 2002, p.121.

**Figura 2.25\_** <https://www.archccess.com/2018/04/Are-draftmen-relevant-architecture-today.html>  
(esquerda) <https://www.archccess.com/2018/04/Are-draftmen-relevant-architecture-today.html> (direita)

**Figura 2.26\_** <http://www.expositions-universelles.fr/1851-exhibition-londres.html> (esquerda)  
<http://frenchculturalcenter.org/events/the-eiffel-tower-and-the-zakim-bridge-landmarks-of-structural-art/> (direita)

**Figura 2.27\_** <https://computacaograficaecinema.wordpress.com/2013/07/05/historia-da-computacao-grafica-sketchpad-a-man-machine-graphical-communication-system-2/>

**Figura 2.28\_** <https://aehistory.wordpress.com/1982/08/04/1982-autocad-v1-0/> (esquerda)  
[http://www.fourmilab.ch/autofile/images/roadshow\\_1985/](http://www.fourmilab.ch/autofile/images/roadshow_1985/) (direita)

**Figura 2.29\_** <http://arqa.com/english-es/architecture-es/serpentine-gallery-pavillion-2009.html>

**Figura 2.30\_** Kolarevic 2003, p.280. (cima) <https://www.archdaily.com/447205/the-gherkin-how-london-s-famous-tower-leveraged-risk-and-became-an-icon-part-2> (baixo)  
<https://plus.maths.org/content/perfect-buildings-maths-modern-architecture> (direita)

**Figura 2.31\_** Schittich 2013, p.26. (esquerda) Kolarevic 2005, p.121. (meio) Schittich 2013, p.48.  
(direita)

**Figura 2.32\_** Imagem do autor.

**Figura 2.33\_** <https://www.drawingmatter.org/sets/drawing-week/foster-partners/> (esquerda)  
<https://news.microsoft.com/en-gb/features/the-power-of-mixed-reality-in-the-modern-workplace/> (direita)

**Figura 2.34\_** <http://www.engineersjournal.ie/2018/01/23/hartford-stadium-collapse-software/>

### **Capítulo 3 \_ Projetar com o Invisível**

**Figura 3.1\_** <http://www.spacesyntax.com/project/victoria-station/>

**Figura 3.2\_** <https://www.dezeen.com/2014/06/11/arup-3d-printed-structural-steel-building-components/>

**Figura 3.3\_** Burry 2012, p.120-121.

**Figura 3.4\_** <https://www.gmp-architekten.com/projects/> (esquerda)  
<https://www.rikysongsu.com/blog/2017/4/26/stuttgart-airport> (direita)

**Figura 3.5\_** <https://www.architecturaldigest.com/story/2015-pritzker-prize-frei-otto>

**Figura 3.6\_** <https://www.designboom.com/architecture/queens-museum-never-built-new-york-exhibition-panorama-kickstarter-05-22-2017/> (esquerda)  
<https://wowair.us/magazine/montreals-biosphere/> (direita)

**Figura 3.7\_** <https://www.archdaily.com.br/br/787030/classicos-da-arquitetura-ville-radieuse-le-corbusier>

**Figura 3.8\_** Peters 2018, p.30.

**Figura 3.9\_** Peters 2018, p.60.

**Figura 3.10\_** Imagem do autor.

**Figura 3.11\_** <https://dansavage.co.uk/siemens-the-crystal/>

**Figura 3.12\_** Nerdinger 2005, p.53.

**Figura 3.13\_** Addis 2007, p.475.

**Figura 3.14\_** <http://www.europeanheritageawards.eu/winners/kings-cross-station/> (esquerda)  
<https://www.designboom.com/architecture/sanaa-rolex-learning-center/> (direita)  
<https://archpaper.com/2016/10/toyo-ito-metropolitan-opera-house-taichung/#gallery-0-slide-0> (baixo)

**Figura 3.15\_** <https://divisare.com/projects/332588-arata-isozaki-pygmalion-karatzas-qatar-national-convention-center> (cima/esquerda) <https://divisare.com/projects/332588-arata-isozaki-pygmalion-karatzas-qatar-national-convention-center> (cima/meio)  
<http://www.yamasaki-inc.com/arts-QNCC.html?m1> (cima/direita)  
<https://divisare.com/projects/332588-arata-isozaki-pygmalion-karatzas-qatar-national-convention-center> (baixo/esquerda) <http://www.yamasaki-inc.com/arts-QNCC.html?m1> (baixo/meio) <https://gustafs.com/portfolio-items/qatar-national-convention-centre/> (baixo/direita)

**Figura 3.16\_** <https://www.qf.org.qa/content/20th/twenty-years-of-serving-the-local-community>

**Figura 3.17\_** [http://www.architectureweek.com/2008/0227/tools\\_1-2.html](http://www.architectureweek.com/2008/0227/tools_1-2.html) (esquerda) <http://obleo-pr.com/2009/05/topologica/> (direita)

**Figura 3.18\_** [http://www.architectureweek.com/2008/0227/tools\\_1-2.html](http://www.architectureweek.com/2008/0227/tools_1-2.html)

**Figura 3.19\_** <http://www.cgarchitect.com/2007/03/vismasters-design-modeling-and-visualization-conference--imagina-2007-review>

**Figura 3.20\_** [http://www.architectureweek.com/2008/0227/tools\\_1-2.html](http://www.architectureweek.com/2008/0227/tools_1-2.html) (esquerda)  
<http://www.victorbuyck.be/en/references> (direita)

**Figura 3.21\_** <http://obleo-pr.com/2009/05/topologica/>

**Figura 3.22\_** <https://misfitsarchitecture.com/tag/qatar-national-convention-centre/>

**Figura 3.23\_** <https://misfitsarchitecture.com/tag/qatar-national-convention-centre/> (cima)  
<https://www.building.co.uk/focus/steel-yourself-the-qatar-national-convention-centre/3137052.article> (baixo) <http://www.victorbuyck.be/en/references> (direita)

**Figura 3.24\_** <https://i.pinimg.com/736x/cc/cb/68/cccb68573a5489c46f96771eeb2450a6--la-dolce-dolce-vita.jpg>

**Figura 3.25\_** Imagens do autor.

**Figura 3.26\_** <https://www.businessinsider.com/a-look-inside-via-57-west-2016-2> (esquerda)  
<http://www.gaelarnaud.com/index.php?pictdiapoid=6> (direita)  
<https://www.designboom.com/architecture/bjarke-ingels-big-breaks-ground-on-grove-at-grand-bay-miami-12-22-2013/> (baixo)

**Figura 3.27\_** <https://www.electricpedals.com/blog/2012/05/16/boo-to-the-scoop> (cima)  
<https://divisare.com/projects/290433-foster-partners-nigel-young-dennis-gilbert-city-hall> (baixo) <https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Colin/London> (direita)

**Figura 3.28\_** <https://divisare.com/projects/290433-foster-partners-nigel-young-dennis-gilbert-city-hall> (cima)  
[https://en.wikipedia.org/wiki/%C3%89vrrard\\_d%27Espinques#/media/File:Holy-grail-round-table-ms-fr-112-3-f5r-1470-detail.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/%C3%89vrrard_d%27Espinques#/media/File:Holy-grail-round-table-ms-fr-112-3-f5r-1470-detail.jpg) (baixo)

**Figura 3.29\_** Kolarevic 2003, p.84.

**Figura 3.30\_** Kolarevic 2003, p.85.

**Figura 3.31\_** <https://www.fosterandpartners.com/projects/city-hall/#development>

**Figura 3.32\_** Kolarevic 2003, p.86.

**Figura 3.33\_** Kolarevic 2003, p.87

**Figura 3.34\_** Kolarevic 2003, p.87.

**Figura 3.35\_** <https://www.fosterandpartners.com/projects/reichstag-new-german-parliament/>  
(esquerda) <https://divisare.com/projects/290433-foster-partners-nigel-young-dennis-gilbert-city-hall> (direita)

**Figura 3.36\_** Schittich 2013, p.117.

**Figura 3.37\_** <https://divisare.com/projects/290433-foster-partners-nigel-young-dennis-gilbert-city-hall>

**Figura 3.38\_** <https://divisare.com/projects/290433-foster-partners-nigel-young-dennis-gilbert-city-hall>

**Figura 3.39\_** <https://www.fosterandpartners.com/projects/city-hall/#construction>

**Figura 3.40\_** Kolarevic 2003, p.92.

**Figura 3.41\_** Peters 2018, p.2. (esquerda) Addis 2007, p.532. (direita)

**Figura 3.42\_** Addis 2007, p.553. (esquerda) <https://www.architectural-review.com/attachment?storycode=8689663&attype=P&atcode=1452223> (direita)

**Figura 3.43\_** <https://www.melbournerecital.com.au/experience/access-/> (esquerda)  
<http://www.detourla.com/start-here-exploring-los-angeles/walt-disney-concert-hall>  
(direita) <https://www.metalocus.es/en/news/concert-hall-jean-nouvel-opening-and-discord-paris> (baixo)

**Figura 3.44\_** <https://www.elbphilharmonie.de/en/press/elbphilharmonie/project-development>

**Figura 3.45\_** <https://www.archdaily.com/802093/elbphilharmonie-hamburg-herzog-and-de-meuron>

**Figura 3.46\_** <https://www.elbphilharmonie.de/en/elbphilharmonie>

**Figura 3.47\_** <https://www.archdaily.com/798817/herzog-and-de-meurons-elbphilharmonie-in-hamburg-photographed-by-iwan-baan> (cima)  
<https://www.ndr.de/kultur/musik/klassik/Elbphilharmonie-Die-Plaza-wird-eroeffnet,elbphilharmonieplaza100.html> (baixo)

**Figura 3.48\_** <https://www.elbphilharmonie.de/en/press/elbphilharmonie/grand-hall>

**Figura 3.49\_** <https://www.ancient.eu/image/415/> (cima)  
<http://www.shakespearesglobe.com/discovery-space/previous-productions/romeo-juliet-5> (baixo)

**Figura 3.50\_** <https://www.elbphilharmonie.de/en/press/elbphilharmonie/grand-hall> (esquerda)  
<https://magaceen.com/en/architecture/elbphilharmonie/> (direita)

**Figura 3.51\_** <https://danperry.livejournal.com/117871.html>

**Figura 3.52\_** <https://architizer.com/blog/inspiration/stories/architectural-details-herzog-de-meuron-elbphilharmonie/>

**Figura 3.53\_** <https://www.elbphilharmonie.de/en/elbphilharmonie> (esquerda)  
[http://www.nagata.co.jp/e\\_news/news1702-e.html](http://www.nagata.co.jp/e_news/news1702-e.html) (direita)



**Figura 3.54\_** <https://www.wired.com/2017/01/happens-algorithms-design-concert-hall-stunning-elbphilharmonie/> (esquerda) <http://onetoone.net/#/project/elbphilharmonie-hamburg/9> (direita)

**Figura 3.55\_** [http://www.nagata.co.jp/e\\_news/news1702-e.html](http://www.nagata.co.jp/e_news/news1702-e.html) (esquerda)  
[http://www.nagata.co.jp/e\\_news/news1702-e.html](http://www.nagata.co.jp/e_news/news1702-e.html) (direita)

**Figura 3.56\_** <https://www.elbphilharmonie.de/en/press/elbphilharmonie/grand-hall>

**Figura 3.57\_** [http://www.nagata.co.jp/e\\_news/news1702-e.html](http://www.nagata.co.jp/e_news/news1702-e.html)

**Figura 3.58\_** <https://www.computerworks.de/produkte/vectorworks/vectorworks-spotlight/referenzen-spotlight/details/ein-neues-wahrzeichen-fuer-hamburg.html> (esquerda) <https://www.ada-amc.eu/1609?&wslanguage=en> (direita)

**Figura 3.59\_** <http://www.faz.net/aktuell/technik-motor/akustik-in-der-elbphilharmonie-wo-zehntausend-toene-unter-die-weisse-haut-gehen-14164587.html> (esquerda)  
<https://www.elbphilharmonie.de/en/press/elbphilharmonie/grand-hall> (direita)

**Figura 3.60\_** <http://www.faz.net/aktuell/technik-motor/akustik-in-der-elbphilharmonie-wo-zehntausend-toene-unter-die-weisse-haut-gehen-14164587.html>

**Figura 3.61\_** <https://www.domusweb.it/en/news/2010/05/28/elbphilharmonie-hamburg-by-herzog--de-meuron.html> (cima) <https://www.ada-amc.eu/1609?&wslanguage=en> (baixo)  
<https://www.area-arch.it/en/elbphilharmonie-hamburg/> (direita)

**Figura 3.62\_** <https://divisare.com/projects/179234-herzog-de-meuron-iwan-baan-jose-campos-oliver-heissner-mi-chenxing-elbphilharmonie>

**Figura 3.63\_** <https://divisare.com/projects/179234-herzog-de-meuron-iwan-baan-jose-campos-oliver-heissner-mi-chenxing-elbphilharmonie> (esquerda)  
<https://www.elbphilharmonie.de/en/press/elbphilharmonie/grand-hall> (direita)

**Figura 3.64\_** <https://transsolar.com/projects/concert-hall-elbphilharmonie>

**Figura 3.65\_** <https://transsolar.com/projects/concert-hall-elbphilharmonie>

**Figura 3.66\_** Imagem do autor.

**Figura 3.67\_** Imagem do autor.

**Figura 3.68\_** Imagens do autor.

**Figura 3.69\_** Imagens do autor.

**Figura 3.70\_** Imagens do autor.